The History of Astronomy

丛书主编 / 江晓原　　走近科学史丛书

天文学的历史

钮卫星　著



VISIT...

LANZAROTE Caliente.COM

传播科学需要新理念

——《走近科学史丛书》总序

传统的“科普”概念，在18、19世纪曾经呈现过不少令科学家陶醉的图景。

那时会有贵妇人盛装打扮后，在夏夜坐在后花园的石凳上，虔诚地聆听天文学家指着星空向她们普及天文知识。那时拉普拉斯侯爵为他的“受过良好教育的”读者写了《宇宙体系论》这样主题宏大的科普著作，大受欢迎，他去世时已经修订到第六版，其中新增加的七个附录中居然有两个和中国有关（一个是关于中国古代“周公测影”的数据，一个涉及元代郭守敬测算的黄赤交角数值）。

至少在19世纪，衣冠楚楚的听众还会坐在演讲厅里，聆听科学家面向公众的演讲。这样的场景让科学家感觉良好。在科学家和大众媒体的通力合作之下，营造出了科学和科学家高大、完美的形象，这种形象在很长时间里确实深入人心。

基于20世纪50年代之前中国公众受教育程度普遍低下的现实，在中国形成的传统“科普”概念，也是一幅类似的图景：广大公众对科学技术极其景仰，却又懂得很少，他们就像一群嗷嗷待哺的孩子，仰望着从天而降的伟大的科学家们，而科学家们则将科学知识“普及”（即“深入浅出地”、单向地灌输）给他们。这一很大程度上出于想象的图景，也曾在很大时间里让中国的科学家和“科普工作者”相当陶醉。

然而，上面这番图景，到今天早已时过境迁。

今天有些中老年人士感慨“科普”盛况不再，常喜欢拿当年《十万个为什么》丛书如何畅销来说事，他们质问道：为什么我们今天的科普工作者不能再拿出那么优秀的作品来了呢？其实这种质问也是“伪问题”—因为当年的《十万个为什么》到底算不算“优秀”，是一个必须商榷的前提。事实上，如果将当年的《十万个为什么》和今天的同类书籍相比，后者信息更丰富，界面更亲切，早已经比《十万个为什么》进步许多。

而当年的《十万个为什么》之所以创造了销售“奇迹”，那是因为当时几乎没有任何同类作品，故《十万个为什么》客观上处于市场垄断的状态。其实这种特殊机制下的“奇迹”在改革开放之前并不罕见，例如，“文革”结束后最早恢复出版的科普杂志之一《天文爱好者》，也有过订阅量超过百万份的辉煌记录。而今天国内的科普类杂志，能

有几万份的销量就可以傲视群伦了。

从更深的层次来思考，则另有两个非常重要的原因。

第一个是，在以往的一百年中，科学自己越来越远离公众。科学自身的发展使得分科越来越细，概念越来越抽象，结果越来越难以被公众理解。

第二个是，中国公众（至少是广大城镇居民）的受教育程度普遍提高，最基础的科学知识都已经在学校教育中获得，对以《十万个为什么》为代表的传统型科普作品的需求自然也就大大消减了。

所以基本上可以断言，传统“科普”概念已经过时—它需要被超越，需要被包容进一个涵义更广、层次更高的新理念之中。

这个新的理念何以名之？有几个不同的名称，目前都在被使用：“科学文化”、“科学传播”、“公众理解科学”、“科学文化传播”等等。

随着科学取得的成就越来越多，它从社会获取资源变得越来越容易，它自身也变得越来越傲慢。许多科学共同体的成员认为，科学不再需要得到公众的理解—它是那么深奥，反正一般公众也理解不了，广大纳税人只需乖乖将钱交给科学家用就行了。

对于这种局面的批评和反思，早在20世纪下半叶就在西方发达社会中出现了，并且在大众传媒中逐渐获得了相当大的话语权。这种让科学共同体的某些成员痛心疾首的现象，其实未尝不可以视为一种进步。今天，科学家既然已经接受纳税人的供养，他们当然有义务让纳税人—即广大公众—知道自己在干什么事？这些事有什么意义？这些事对公众和社会的福祉是有利还是有害？

在这个新理念中，科学知识固然应该得到准确同时又是通俗的讲解—如果公众需要这种讲解的话，但与此同时，科学技术与社会、文化、历史等方面的关系，包括科学技术的负面作用、科学技术在未来可能带来的灾祸，我们应该怎样看待科学技术等等，也都是重要的内容。这是一幅科学与公众双方相互尊重、相互影响的互动图景，它取代了以往那种“科学高高在上，公众嗷嗷待哺”的单向灌输（普及）的图景。

最后还有一点值得特别强调：如今任何一本优秀的科学文化书籍都不必讳言自身的娱乐作用。如今“娱乐”对于科学来说不是耻辱，相反，应该是一件光荣的事情。因为随着公众受教育程度的持续提高，以及互联网带来的便捷信息，公众中已经极少有人会需要靠“科普”书籍去寻求工作、学习或生活中问题的解答。现在他们之所以愿意披阅一本与科学有关的书籍，经常是为了寻求娱乐—当然多半是智力上的娱乐。

这套《走近科学史丛书》，就是实践上述“科学文化”理念的新尝试。各位作者皆为科学史界卓有成就的名家，书中所谈，除了科学技术本身，也涉及与此有关的思想、哲学、历史、艺术，及至对科学技术的反思。这种内涵更广、层次更高的作品，以“科学文化”称之，无疑是最合适的。

前几年Discovery频道的负责人访华，当中国媒体记者问他“你们如何制作这样优秀的科普节目”时，该负责人立即纠正道：“我们制作的是娱乐节目。”仿此，如果《走近科学史丛书》的出版人被问道“你们为何要出版这套科普书籍”时，我建议他们也立即纠正道：“我们出版的是科学文化书籍。”

江晓原

第一章 天文学的萌芽

天文学在文明早期的人类知识体系中，一方面体现为一种实用的生存手段，游牧部落和定居的农耕民族都需要一定的天文知识以适应自然的节奏；另一方面，因为自然和天空呈现出的各种现象给人带来的惊异、神秘和敬畏等感性上的冲击，由此发展起来一套天人之际的互动模式，这反过来也无意中催生了对天体运动规律的把握和追求，某种现代形态的天文学因此得以萌芽。

1.一些基本天象

古人很早就对一些基本的天文现象有了一定的认识。譬如认识到天似穹庐，像盖子一样笼罩在上方；认识到昼夜交替，白天的太阳、晚上的星星都东升西落；认识到气候有寒来暑往、冷暖交替。还会观察到天空中的一些特殊现象，如月相变化、日月交蚀、彗孛流陨等。古人对这些基本天文现象的记录、描述和解释构成了上古时期天文学的主要内容。



图1.1　郑州大河村仰韶文化的新石器时代遗址出土彩陶上描绘太阳及其光芒的图案。

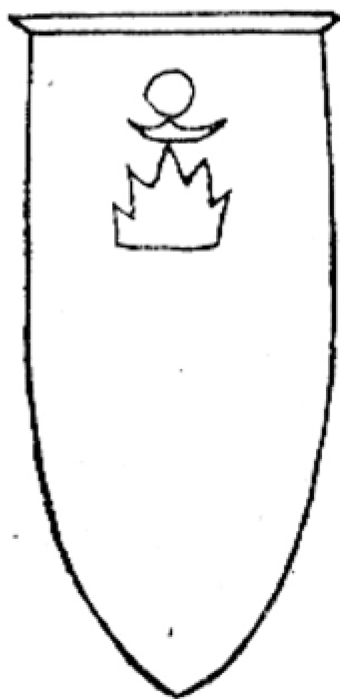


图1.2　山东大汶口文化遗址出土的距今约4500 年的陶尊上反映日出的字符。

“太阳下山明天依旧爬上来”，这种对太阳东升西落这一周日视运动现象的确认是人类认识其自身生存环境的一大进步。太阳的周日视运动带来了昼夜交替，是人们“日出而作、日入而息”的信号。

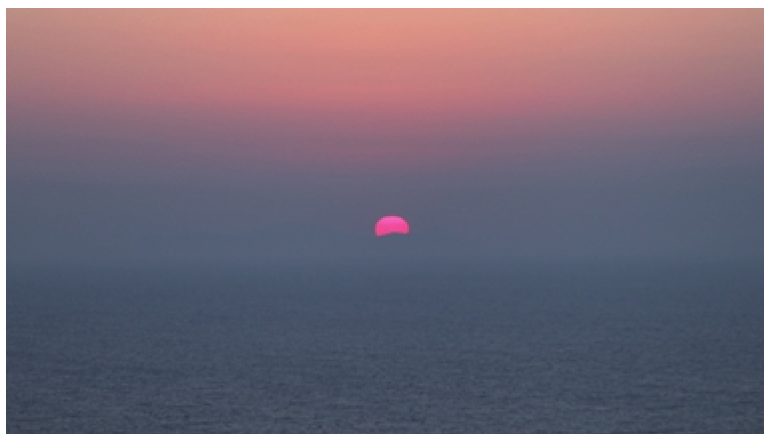
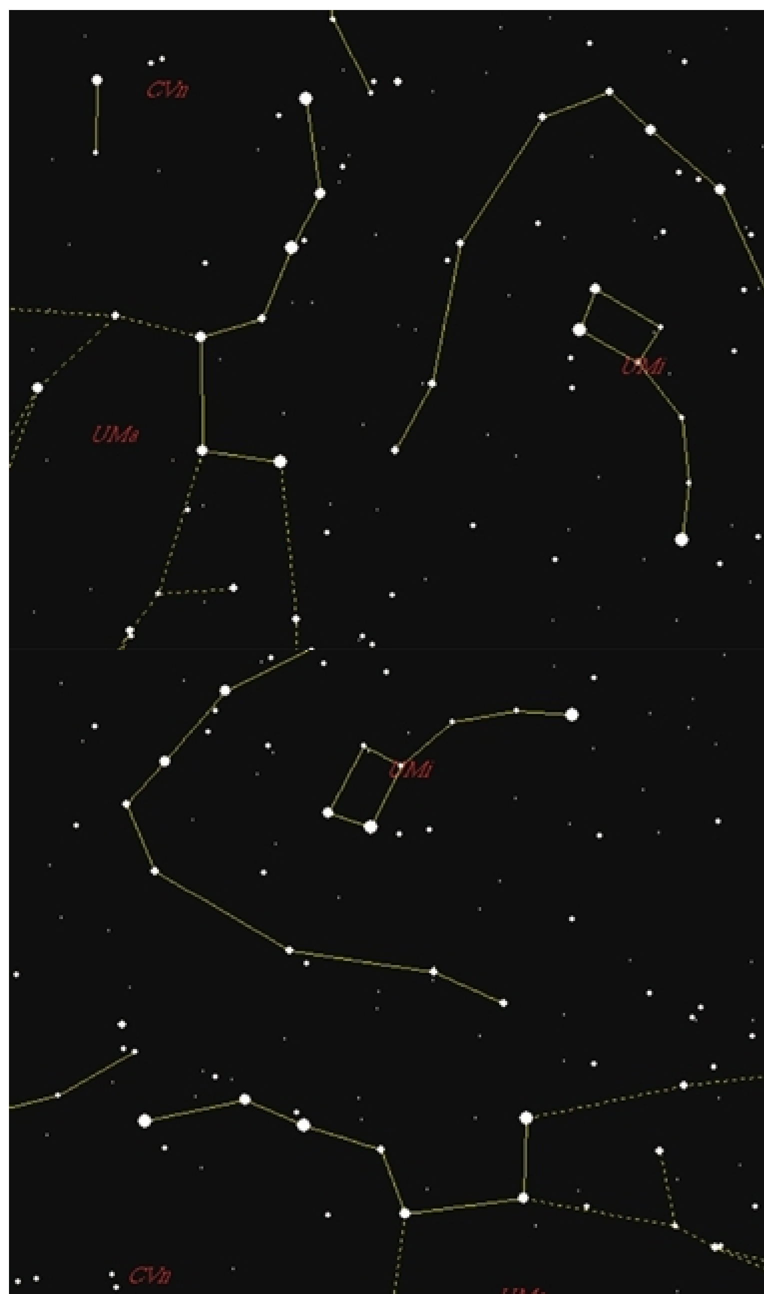


图1.3　日落景象，2012年7月27日作者拍摄于希腊圣托里尼岛伊奥镇。

先民们还认识到一种重要的周期性变化，就是寒来暑往的周年变化，他们认识到这种寒暑变化与一些特征天象联系在一起，如“斗柄东指，天下皆春；斗柄南指，天下皆夏；斗柄西指，天下皆秋；斗柄北指；天下皆冬。”




CVn
UMi
UMa
UMi
CVn

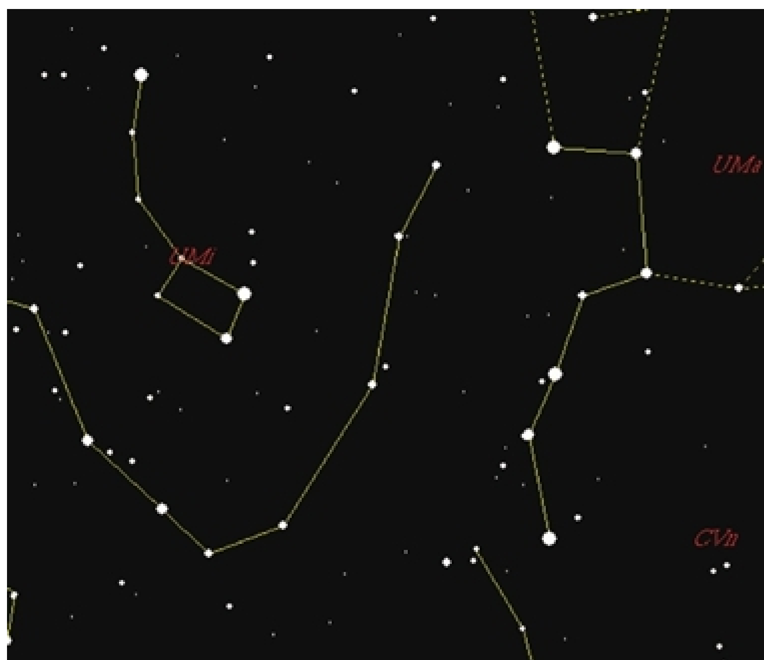


图1.4　春（上左）、夏（上右）、秋（下左）、冬（下右）四季北斗斗柄指向示意图,需要注意的是，观测时间是在黄昏时刻。

月亮在夜空中是最明亮的天体，它被太阳照亮的部分呈现一种周期性变化，这就是月相变化。先民们很早就利用月相变化来计量日子。中国古代大约在西周早期以前，以新月初见在西方天空作为一个月的开始，当时把这个月相命名为“朏”。



图1.5　朏

大约在春秋以后，一个月的第一天改从朔开始。两河流域地区的古巴比伦文明则一直以新月初见作为月的开始，这一点被后来的伊斯兰历法继承。

天空中还有一些偶发的天象也引起古人的关注，譬如彗星、流星等。在长沙马王堆汉墓出土的《彗星占》（168BC）中就绘有形态十分丰富的彗星图。



图1.6　《彗星占》局部。这些形态各异的彗星各有专名以方便指称，这无疑是出于星占的需要，不同形态的彗星对应不同的星占含义，但其中有一些彗尾形态夸张的彗星不一定是实际存在的，有一根或两根尾巴的彗星是比较常见的。

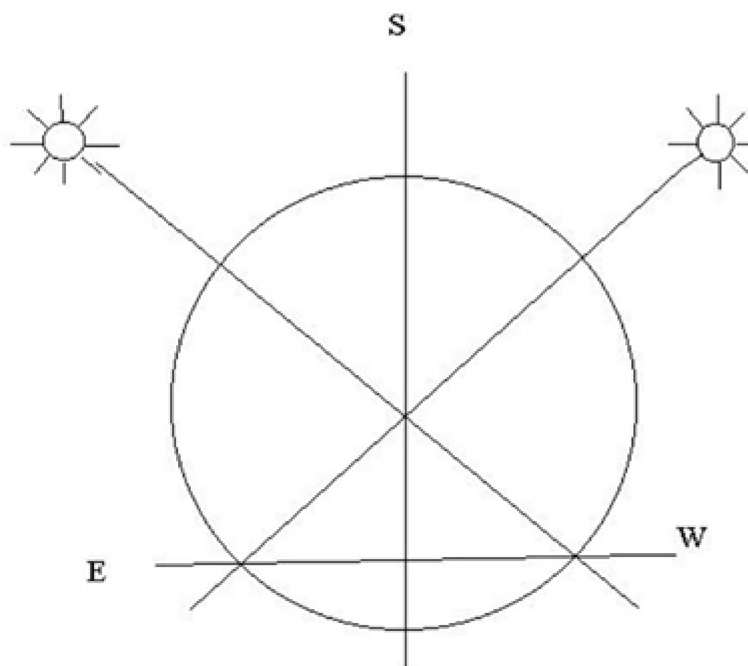
从以上几个例子可知，先民们不管是出于什么目的，对天空中的一举一动都密切注视并记录着。在长期的观察积累之后，古人完成了对一些基本天象的认识，并对一些基本天象的规律有了初步的把握。

2.天文学的实用性

追求隐藏在天文现象背后的抽象规律，还不是上古时期天文学的主要目的。古人通过对一些基本天文现象的认识和规律性的把握，掌握了一些基本的天文技能，来帮助他们创造更好的生存环境。这些实用的天文技能包括辨方向、定季节、定时辰等。

能准确地确定方向，显然是一种很重要的生存手段。在建造房屋的时候可以朝向正确的方向获得最好的采光，在迷路的时候可以找到正确的前进方向。

古人通过“白天望日、夜晚观星”的方法来辨别方向。《周礼·考工记》对此就有记载。



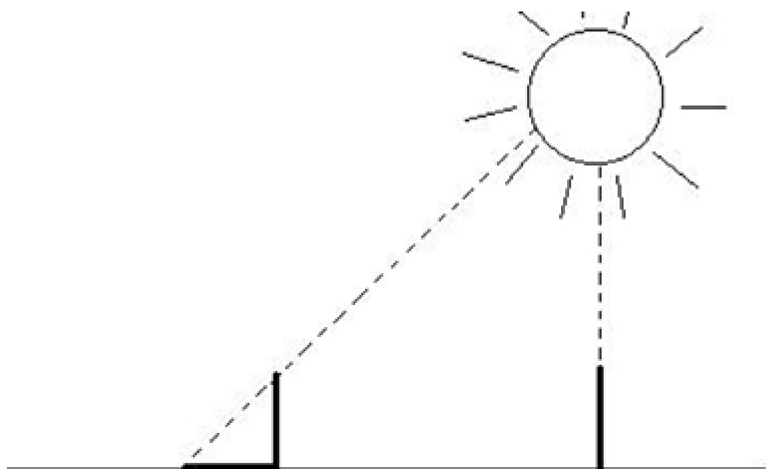


图1.7 《周礼考工记》识日出之景与日入之景（上）与参诸日中之景（下）以确定方向的示意图。

一般认为《考工记》的成书在春秋末、战国初，但书中描述的这种天文技能应该在更早的时候就为古人所掌握。从殷墟发掘出来的房屋基址的朝向来看，大多朝向正确的南方或东方，说明当时应该已经掌握了确定方向的手段。

“万物生长靠太阳”，地球上动植物的生长与因太阳周年运动而带来的气候变化密切相关。先民们通过长期观察，总结出了一些动植物生长与天象、气候变化之间的对应关系，这对先民们的生存而言具有至关重要的意义。

在《尚书·尧典》中就描述了中国古代很典型的观察昏中星确定季节的方法。黄昏时分，观察正南方的恒星，出现的如果是“鸟”星，那么就是春分了。如果分别是大“火”星、“虚”星和“昴”星，那么分别是夏至、秋分和冬至了。在被认为是中国现存最早一部描述天象与物候对应关系的古籍《夏小正》中，有关的记述更为详细。《夏小正》相传是夏代的历法，但有学者认为它成书于战国时代。

利用一年中日出、日没方位的不同也可用来确定季节。譬如，利用天然的或人工建造的标志，来确认太阳在不同日子的出没方位，就有助于人们来确定季节。

在古埃及，每当尼罗河开始泛滥时，天狼星会在清晨东方的晨曦中熠熠闪光，这个天象被叫做天狼星的偕日升。古埃及人便把天狼星的偕日升作为一年的开始。经过长期的观测，埃及人确定两次天狼星偕日升的时间间隔大约为365.25天。埃及人以此为基础，建立了他们的历法。以365天为一年，一年分12个月，每月有30天，年末外加5

天假期。这种只以太阳周年视运动周期即回归年为基础而制定的历法是一种纯阳历，也是现在全世界通行的公历的前身。



图1.8　英国南部威尔特郡的巨石阵（Stonehenge），据学者们研究，观测太阳从哪两块巨石之间升起，就可以判断到了什么季节。

确定一天中的时辰也是日常生活中很要紧的一项事务。古人常用的一个办法就是通过观测日影来确定时辰。利用日影的移动来计时的仪器，叫做“日晷”。由于日晷的制作涉及专门的几何学知识，所以在中国古代比较精确的日晷出现得比较晚。

3.恒星的命名

由于天上恒星的相对位置和亮度看起来经久不变，人们容易对它们进行辨认，为了便于描述和指称，对恒星进行命名是必要的。

起先，人们对恒星命名时往往借用身边熟悉的事物，如斛、臼、定、车、船、箕、斗之类的生活用具；弧矢、毕之类的猎具；鸡、狗、牛、狼等动物；织女、老人等人物。后来，帝座、太子、诸侯等帝王贵族；尚书、三公、将军等文武官职；周、晋、秦、楚等列国名称；羽林、华盖等帝王侍卫和日用器物都被搬上了星空。中国古人命名星空的原则大体上就是把人间万物投影到天上。

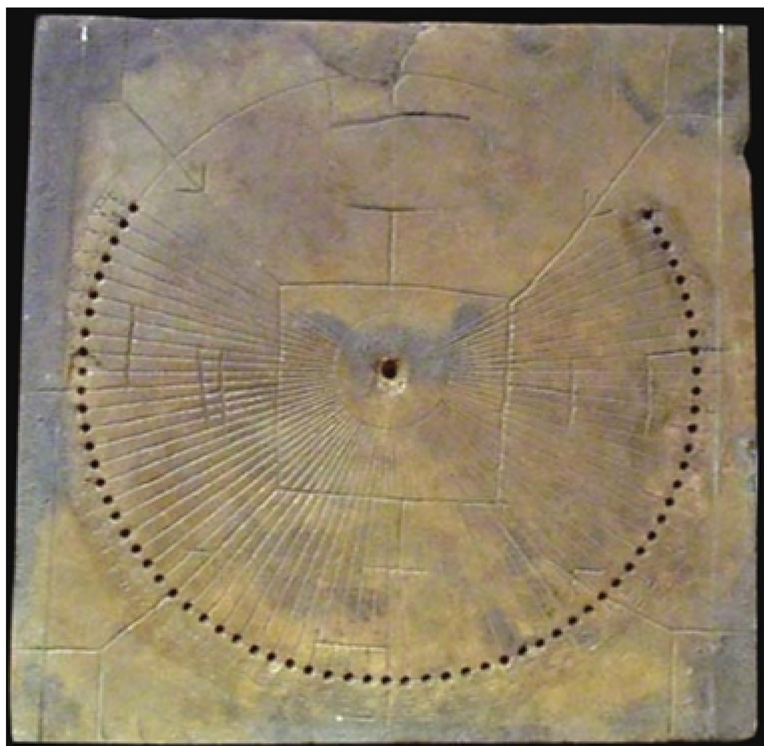


图1.9　现存最早的中国汉代日晷：托克托日晷（现藏中国历史博物馆）。1897年出土于内蒙古托克托县，此晷以方形致密泥质大理石制成，边长27.4厘米，厚3.5厘米。晷面中央为直径1厘米的圆孔，但并不穿透。以中央孔为圆心刻出两个同心圆，内圆与外圆之间刻有69条辐射线。辐射线与外圆的交点上钻有小孔，孔外刻有169的数

字。各辐射线间的夹角相等，如果把未刻线的剩余晷面补足，将把圆周均分为100份。

在给恒星命名的同时，人们为了观测和记忆方便，把恒星划分成不同的星群，各星群星数多寡不等，多到几十颗，少到只有一颗，这样的星群，在中国古代叫做星官。

在保存下来的先秦文献中载有星官数38个，包括恒星200余颗。司马迁著的《史记·天官书》是最早系统描述全天星官的天文著作。《史记·天官书》共载有92个星官，约500余颗恒星，这些星官名称在以后的天文著作中大部分被沿用下来。《汉书·天文志》载有118个星官，783颗恒星，比《史记·天官书》中所载多了不少。张衡在《灵宪》中记载的星官数和恒星数又比《汉书·天文志》增加很多。

自战国秦汉以后，天文星占之术大为流行，形成了许多流派，其中著名的有石氏、甘氏、巫咸等，它们各自都留下了记载恒星位置和名称的星经。在三国时代吴国太史令陈卓把石氏、甘氏、巫咸三家星官并同存异，综合编成了一份具有283官、1464星的星表，并为之绘制了星图。

为了方便记忆，人们把星官和恒星名称编写成韵文、诗歌的形式。早期的作品有北魏张渊的《观象赋》、隋李播的《天文大象赋》等，到《步天歌》的出现，可谓集此类作品之大成。《步天歌》一般被认为是唐王希明所作，用七言韵文介绍陈卓所总结的283官1464星，并配有星图。

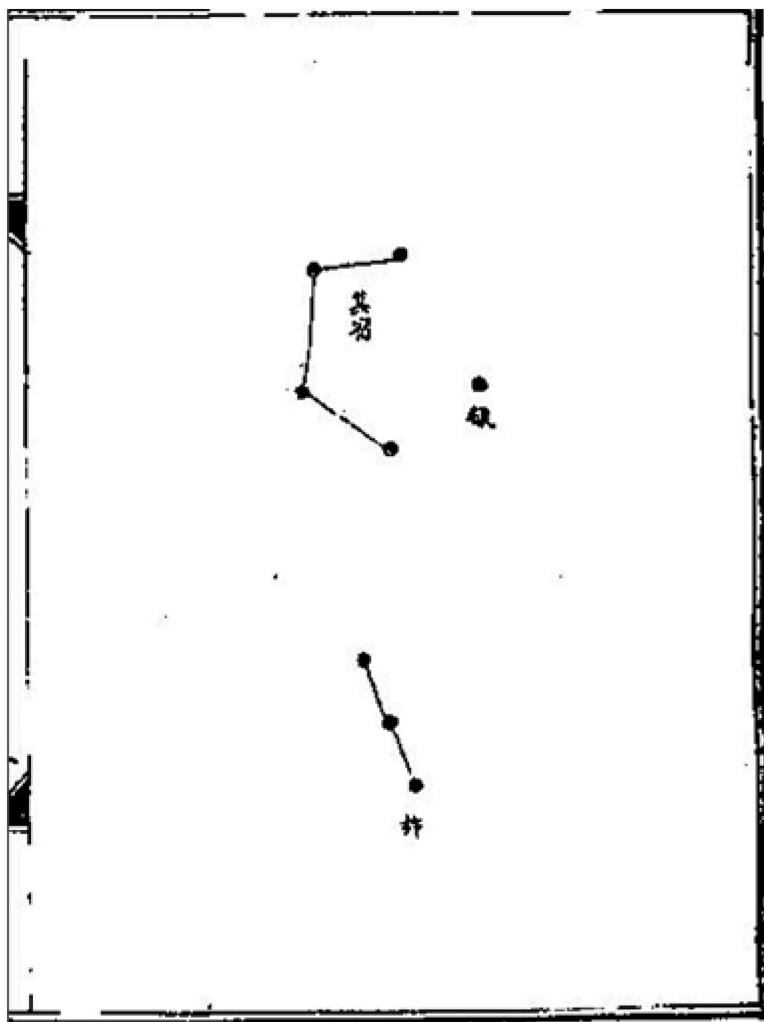


图1.10　《步天歌》之箕宿图，箕宿歌为：四星其形似簸箕，箕下三星名木杵，箕前一黑是糠皮。

《步天歌》对于辨认和记忆全天星斗来说是一种很好的参考手册。然而《步天歌》在中国古代天文学史上能产生重要影响的原因更在于它首次明确地把可观测到的全部天空分作31个大区，即在后世一直流传的三垣二十八宿分区法。

不同的文明对星空的命名和划分，无疑都反映了各自的历史和文化。

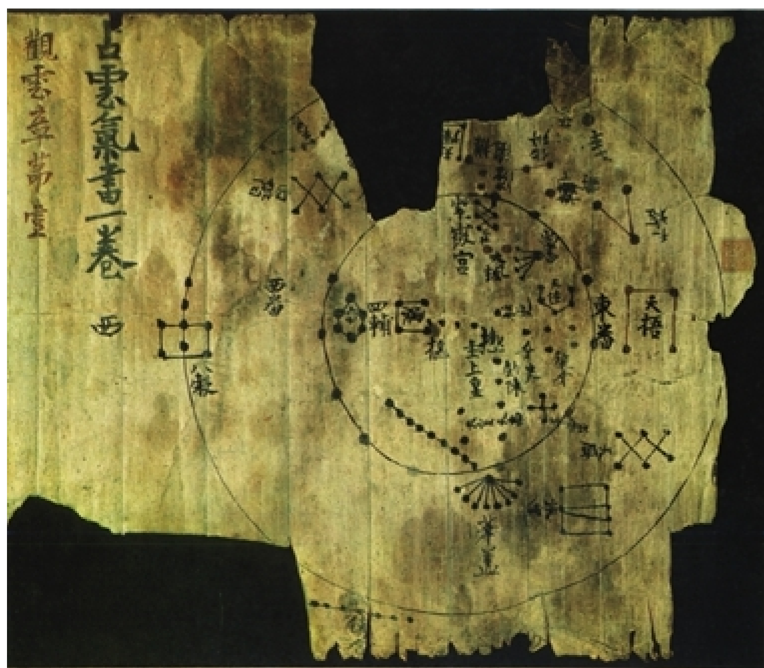


图1.11　敦煌星图乙种,今藏甘肃敦煌县文化馆。长299.5厘米,宽31厘米,正面抄唐代地志,背面残存紫微垣星图一幅,其后为占云气书一卷,抄写年代约在晚唐五代时期。

现在全世界通行的全天星座命名和划分体系始于几千年前的两河流域和埃及地区。约公元前3000年左右，古巴比伦人把较亮的恒星划分成若干星座，后来为希腊和罗马人进一步发展。希腊人主要以神话中的人物或动物为星座命名。到公元 2 世纪，北天星座名称已基本确定。公元17世纪，随着地理大发现的推进和环球航行的成功，海员们观测到了在北半球不能看到的南天恒星，南天共有48个星座获得命名并逐渐确定下来。1841年英国天文学家约翰·赫歇尔提出星座界线，以赤经线和赤纬线划分。1928年，国际天文学联合会（IAU）公布了88个星座方案。

全天88个星座中有12个星座是太阳、月亮和五大行星经常穿行其间的，这12个星座正好绕天一周，它们依次是白羊座、金牛座、双子座、巨蟹座、狮子座、处女座、天秤座、天蝎座、人马座、摩羯座、宝瓶座和双鱼座。以地球为中心，太阳环绕地球一周所经过的视轨迹被称为“黄道”。黄道穿越上述12个星座，因此它们被称为黄道12星座。



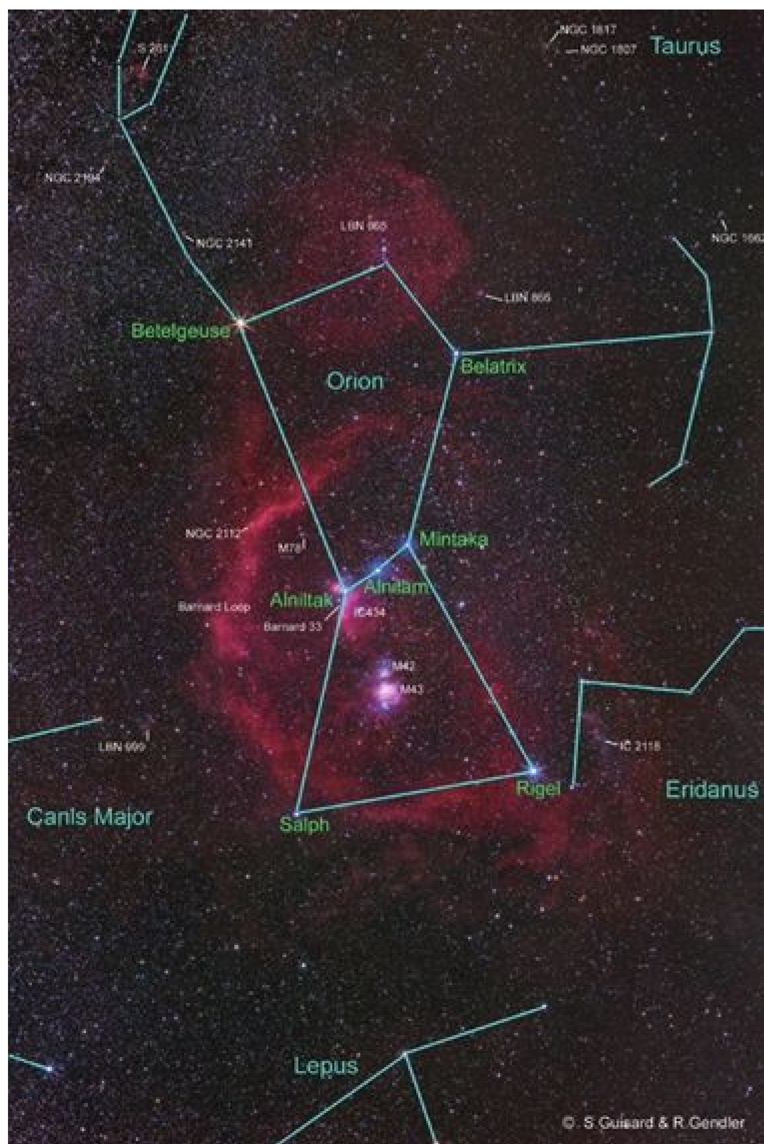


图1.12　星座是这样凑成的：猎户座。



图1.13　太阳、行星、黄道和黄道星座示意图。

实际上古巴比伦人早就对这些黄道星座十分关注了，他们利用12星座作为参照来描述日月行星的运行，为了方便，又把黄道分成12等份，每等份30度，为一宫，太阳每月行经1宫。黄道12宫的命名与黄道12星座相同。

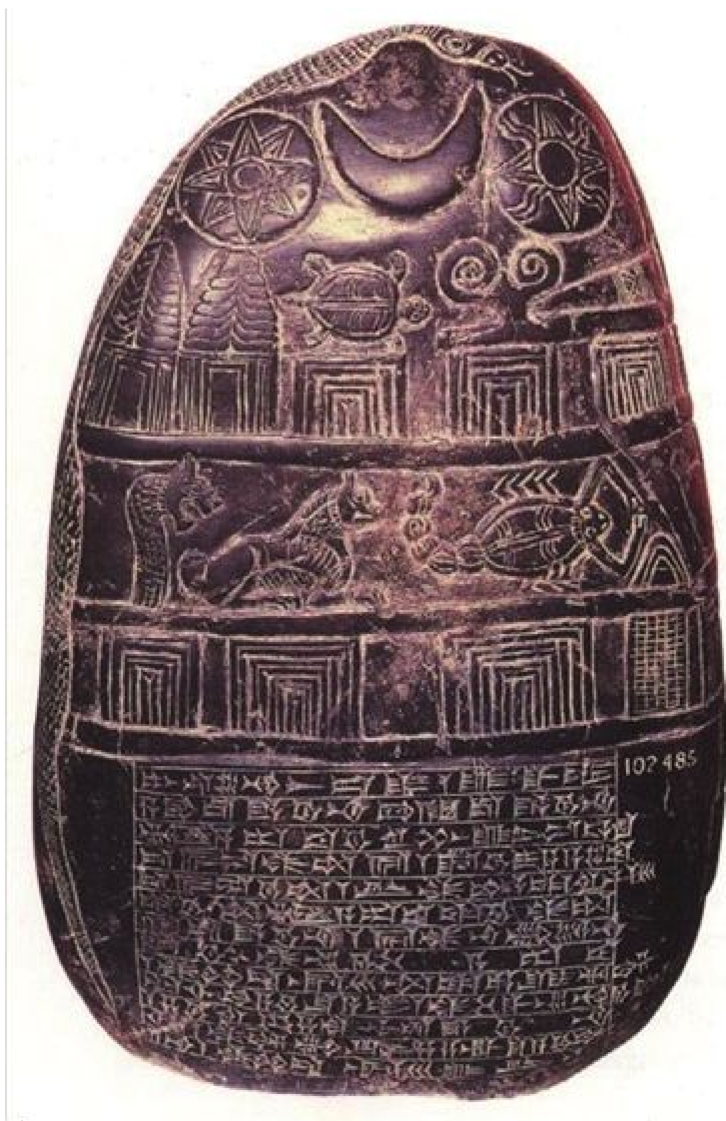


图1.14　公元前1100年左右美索不达米亚一块界石上的黄道星座图形。

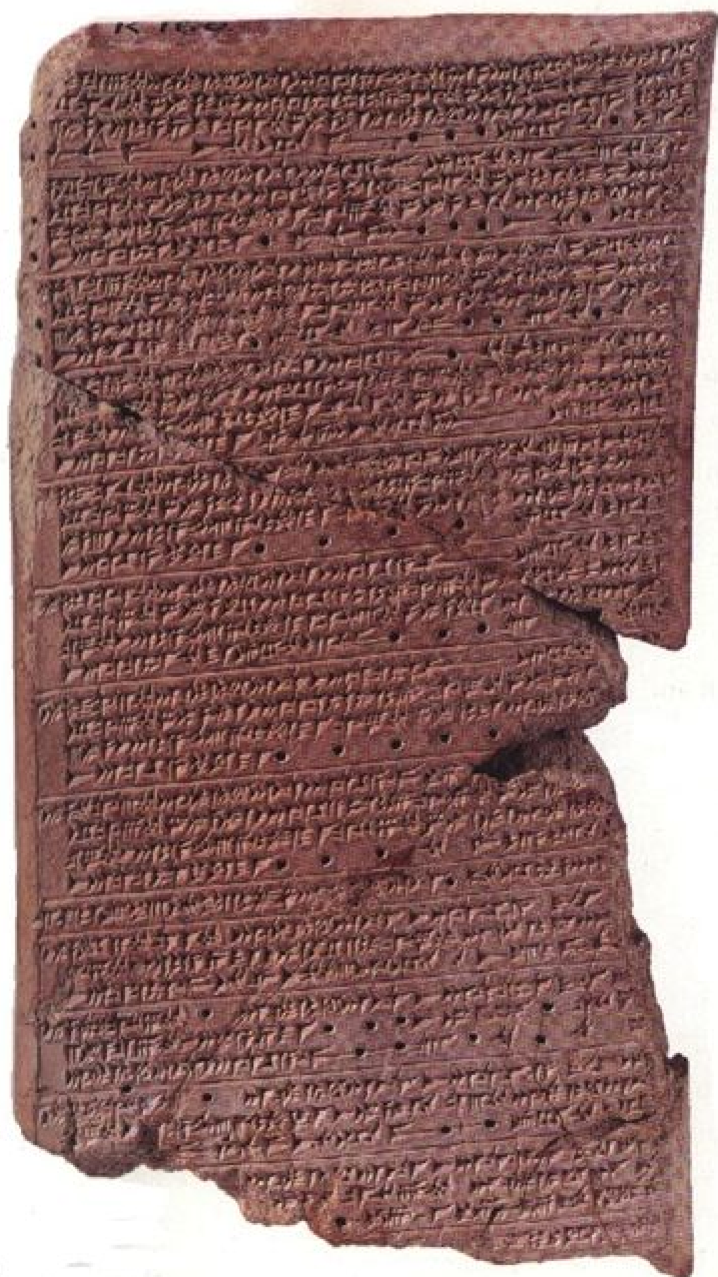


图1.15　公元前17世纪一块记录金星动态的巴比伦泥板文书。

4.从星占学到天文学

生活在不同古代文明的人们，对于预知自己的命运都有一种天然的兴趣，为此而发展起各种各样的命运占卜体系。譬如烧灼一片龟甲、撒一把竹签、扶箕、扔一把铜钱、察看掌纹、洗扑克牌、数流星等等，不一而足，总起来说就是把命运的预测诉诸偶然的现象。

其中有一种特别的占卜方式是利用天上出现的偶然现象来对人间的事务和个人的命运进行预测，这就是星占。现在看来，最早从事这种星占活动的是古巴比伦人。古巴比伦人认为天体都是神，它们能够影响甚至主宰人间的事情。所以他们对天体的观测和对天象的预测，是出于对自己命运进行预测的考虑。

在古巴比伦有一群专门从事观天的人员，他们关注着天上的一举一动，当他们发现不同寻常的天象时，认为这是上天发出的一个信号或者说征兆。征兆所预示的灾祸有可能通过举行适当的仪式而得到避免。经过数十代专职观天者们的观察、记录和解释，积累起了相当可观的天象记录和对应解释。后来者把对征兆的解释编撰成册，形成了一系列占辞表，这些表都以Enuma Anu Enlil字样开头，因此这些占辞集合被叫做Enuma集合。

Enuma集合收集了长达七个世纪之久的各类征兆，细心的星占学家不难发现有些征兆会频繁地重复出现，于是他们从原本被认为是偶然的天文现象中认出了固定不变的规则，太阳、月亮和诸行星运行的周期—也就是规律—逐渐被识别出来并确定下来。

通过所掌握的规律，星占学家有能力对太阳、月亮和行星未来某个时刻的位置进行预推。公元前700年左右，两河流域和巴比伦的统治民族亚述人留下了对天象的数学描述和系统记录。到公元前的最后三个世纪里，即巴比伦的塞琉古时期，有更为丰富的天文泥版文书保存下来。这些泥板文书主要分为两类，一类是星历表文书，这类文书给出天体在不同时刻所在的位置；另一类是程式文书，这类文书说明如何计算星历表。假如抛开其星占目的不论，这些泥板文书中所反映的对天体运动规律的探索，已非常接近于现代天文学的类似探索了。

就这样，一种颇具现代形态的天文学研究形式在古巴比伦星占学家们的星占实践活动中萌发出来，而在其他不同古代文明当中或多或少也都发生着类似的过程。

第二章 古希腊天文学

希腊文明始于爱琴海的两岸和岛屿。该海域西接希腊半岛，东连小亚细亚。其中小亚细亚沿海地区和附近岛屿被称作爱奥尼亚。该地区经济繁荣，贸易发达，民风好辩，崇尚理性。毗邻古老、富裕和成熟的两河流域与埃及文明，又让爱奥尼亚具备了得天独厚的便利条件，能够就近汲取这两个中东文明的丰富知识营养，从而让希腊文明站在了很高的起点上。

1.爱奥尼亚学派的宇宙学

古巴比伦和古埃及乃至古印度等中东和远东民族一般只从实用或神秘的目的出发观测天象；他们只描述观测结果，再附会上神话传说。



图2.1　早期希腊文明的范围

水，首次在解释自然现象时摆脱了神话因素。譬如对于地震现象，泰勒斯是这样解释的：大地像一块圆盘飘浮在海面上，大地四周也有海围绕，并不平静的大海晃动大地引起地震。正因为泰勒斯以自然的原因解释自然的现象，因此他被尊为古希腊科学和哲学的鼻祖。

以泰勒斯为首的爱奥尼亚学派还包括其他几位著名的自然哲学家。其中可以被看作是泰勒斯继承人的阿那克西曼德（约610—546BC）也出生于米利都，阿那克西曼德师从泰勒斯，但提出了自己的万物本原说。他认为万物源于无限，主要目的可能是为了解决泰勒斯的问题，即支撑大地的水本身靠什么支撑？

阿那克西曼德还主张大地不是一块圆盘，而是一个圆柱体。该圆柱体的直径是高的三倍，静止在无限宇宙的中心。人类生活在这个圆柱体的顶面上。在这个圆柱体的外面包围着与前者同轴并转动着的气和火的圆柱面，太阳、月亮和星星是位于这些圆柱面上的一团团火焰，人类看到的只是通过圆柱面上的小孔透射下来的一点点火光。

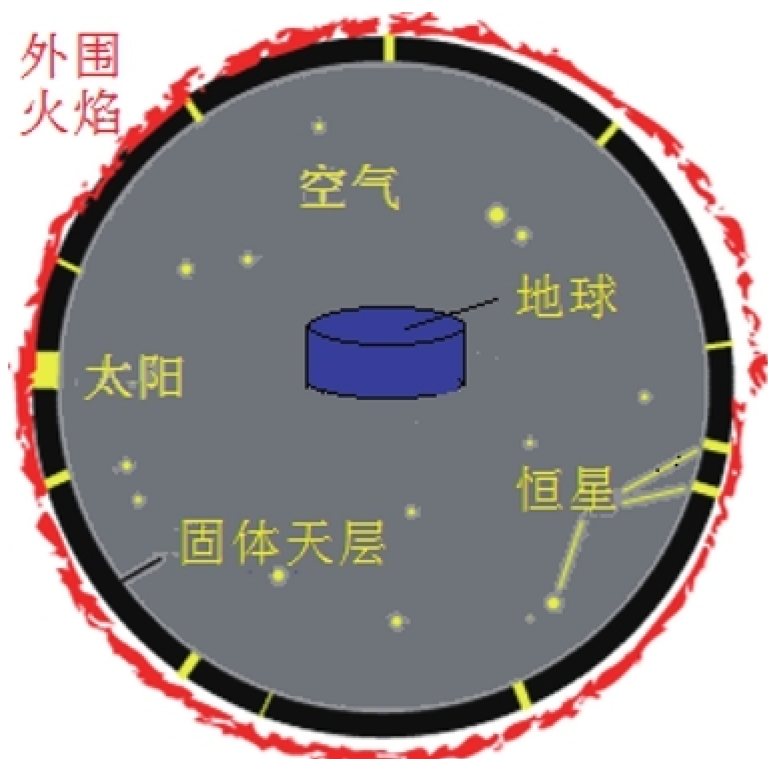


图2.2　阿那克西曼德的宇宙模型。

日月食和月相的变化是因为小孔的开和闭造成的。尽管这些构想现在看来是荒诞不稽的，但阿那克西曼德被认为是第一个尝试构造一个机械宇宙模型的古希腊自然哲学家，有时他甚至还被称作“宇宙学之父”。

爱奥尼亚学派的第三位人物阿那克西米尼（约585—528BC）提出了第三种万物本原说。他主张万物是通过聚散从空气中变化而来的。他认为大地是薄薄的圆片，日月等天体都像树叶一样漂浮在无限的空气中。

在这些爱奥尼亚自然哲学家眼里的宇宙，不再是诸神活跃的舞台，自然现象不再是诸神喜怒无常性格的副产品。他们努力把自然现象归因于自然的原因。更重要的是，他们带着公开、理性和批评的态度提出自己的宇宙观。他们并不盲从前人的观点，他们自己的观点同样受到同行和公众的批评和判断。正是这些爱奥尼亚自然哲学家的努力，为科学研究奠定了一个坚实的理性基础，为人类文明贡献了一个希腊奇迹。

3.柏拉图的“拯救现象”课题

前苏格拉底时期的哲学家，特别是爱奥尼亚学派和毕达哥拉斯学派的哲学家，大多在宏观和整体的层面上关注自然的本性、宇宙的结构，他们的贡献之一就是把自然当作了理性分析的对象。有人说，是苏格拉底（470—399BC）把哲学家的眼光从天上拉到了人间。从苏格拉底开始，哲学从偏重自然转向注重人伦。在这种倾向的影响下，天文学虽然继续保持着与哲学的千丝万缕的联系，但慢慢开始走向成为一门独立的学问。其中苏格拉底的学生柏拉图（427—347BC）首先把天文学归为数学家应该研究的一个领域。

在柏拉图的哲学体系中，世界被切割为两个不同的部分：一个是符合“形式”或“理念”的“超感世界”；一个是我们所能感觉到的“可感世界”。可感世界的事物不过是“理念”的模糊反映或粗糙仿造。

那些真正的“形式”是完美的，而且不会改变的—正因为其完美，所以没有理由被改变或进化，只有使用智力加以理解才能“达到”。

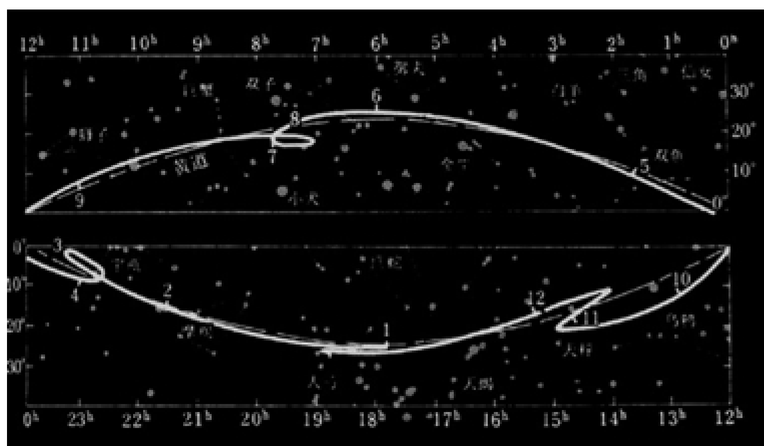


图2.5　希腊人的天文课题：天体既然作完美的匀速圆周运动，行星的不规则视运动就需要得到解释。天文学家的工作就是用各种匀速圆周运动的组合来解释天体运动的不规则视运动。柏拉图提出的这一课题有时被称作“拯救现象”，对这一课题的深入研究为数理天文学的发展开辟了道路。图中显示的是1980年水星的视运动轨迹图。

在柏拉图的两个世界之间，数学占据了一个非常重要的中间地位，数学训练是步入哲学的真正准备。柏拉图试图使天文学成为数学的一个分支。他提议应该用理想的、数学的天文学代替观测的天文

学。

柏拉图还进一步提出了一个将成为几个世纪中天文学家的首要任务的特殊问题，即行星运动问题。据说，柏拉图向学天文的学生们问了这个问题：用匀速而整齐的运动，能否解释行星的视运动？柏拉图的这个问题意味着，他已经认识到行星的视运动显示出了需要解释的不规则，而这种不规则只是看起来如此，其实是由“匀速而整齐的运动”组合而成。



图2.6　柏拉图（左）和亚里士多德（右）。拉斐尔画作《雅典学院》局部。柏拉图手指向上，表示他对“形式”的重视，亚里士多德手伸向大地，表示他强调知识来源于经验和观察。

4.亚里士多德的宇宙

作为柏拉图最杰出的学生，亚里士多德（384－322BC）说过这样的名言："吾爱吾师，吾更爱真理。"确实，从对人类思想的影响程度而言，柏拉图和亚里士多德这对师徒可谓一时瑜亮。柏拉图和亚里士多德哲学最根本的分歧在于，柏拉图强调他的超感世界，而亚里士多德更注重感性世界。柏拉图断言感觉不可能是真实知识的源泉，而亚里士多德却认为知识首先源自感觉。

从亚里士多德在《物理学》中的论述中，我们确实可以体会到他对经验和观察的依赖。亚里士多德说，所有地球上的物质都是由四种基本元素即土、水、气和火组成的，其中每种元素都代表热、冷、干、湿四种基本特性中两种特性的组合：土是干和冷的组合；水是湿和冷的组合；气是湿和热的组合；火是干和热的组合。

亚里士多德把地球上物体的运动分为自然运动和强迫运动。自然运动是由组成这些物体的物质本性引起的；强迫运动只能暂时地由外部强加。自身性质决定一些物体下落，称为重物体，如由土和水构成的物体；一些轻物体由其性质决定上升，如气和火构成的物体。

与地球上物体的上升和下落的自然运动不同，还有一种天体所特有的永恒的均匀的完美的圆周运动。天体不是由地球上的四种元素组成，而是由第五种元素构成，亚里士多德把这第五种元素称为以太，这是一种不生、不灭、永恒的完美物质。

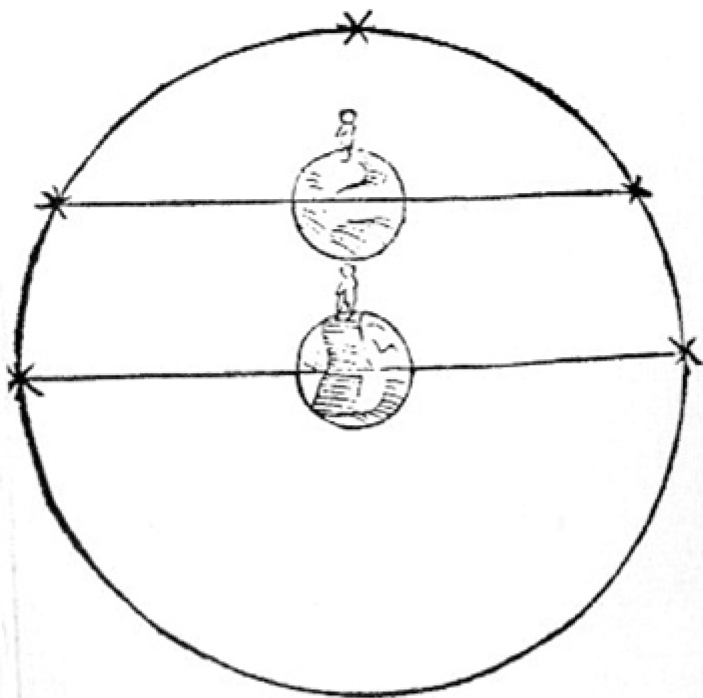


图2.7　亚里斯多德对地球处于宇宙中心的论证之一：因为我们时时刻刻正好看到半个天球，所以地球必然位于宇宙的中心。

匀速圆周运动是第五元素性质所固有的完美运动。亚里士多德把月亮所在的天层作为天地的分界，月下世界是由四元素构成的不完美世界，月上世界则是由第五元素构成的完美天界。由于天界是完美的、永恒不变的，所以也不会出现新鲜事物。因此，在亚里士多德看来，彗星这种现象只能发生在月下世界的大气层里，因而不是天象。

在上述概念基础上，亚里士多德明确地导出两个推论：（1）宇宙结构本质上是以地球为中心，沉重的地球由于它特别的性质，正好静止于宇宙的中心。（2）把适用于地球上的概念和推理运用到天体上去，这在逻辑上是不可能的。特别是把地球也看作是个天体，这是荒谬的想法。

亚里士多德虽然没有对当时雅典学院提出的“拯救现象”课题给出什么解决方案，但他的天文学和宇宙学观点对后世产生了深远的影响。他的运动学和动力学原理为支持地静说反对地动说提供了理论依据，直到伽利略将之推翻为止。



图2.8　火星冲日前后的视轨迹。图中所示的是从2005年7月下旬到2006年2月的火星轨迹，每两个光点之间相隔7天，从右下到左上是从西向东的顺行方向，两个拐弯处是“留，两次留之间是“逆行段。

当然，我们现在应该看到亚里斯多德和其他希腊思想家的最大功绩是把自然当成了科学研究的对象，亚里士多德称得上是自然最坦率的观察者。

5.欧多克斯的同心球理论

柏拉图的另一个学生欧多克斯（约410—356BC）首先尝试去解答柏拉图完美原则指导下的那个天文课题。欧多克斯深深领会了柏拉图思想的精义，即把天文问题化作一个数学问题来处理，用完美的匀速圆周运动去解释不规则的天体视运动。

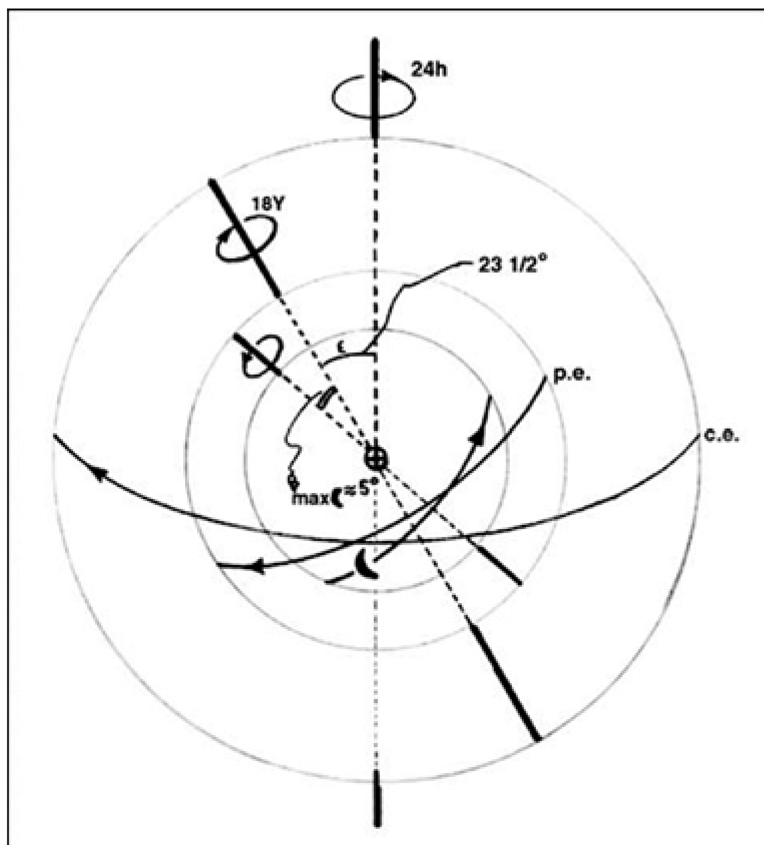


图2.9　欧多克斯为解释月亮视运动而设置的三个同心球。月亮的东升西落的周日运动需要一个球。第二个从西往东转动的球解释月亮在恒星间的穿行，一个月转一圈。第三个球解释月亮在黄纬方向上的运动。月亮同时参与这三种运动，形成我们观测到的视运动。

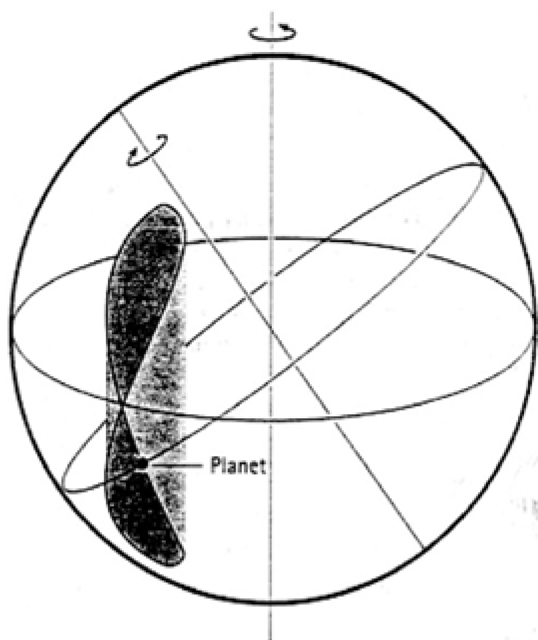


图2.10　欧多克斯“马蹄形：行星同时参与两个球的转动而走出来的轨迹。

欧多克斯提出每一个天体的复杂视运动轨迹都是由若干个同心球的匀速圆周运动复合而成的。他一共设置了27个同心球：恒星1个，5颗行星每颗4个，太阳和月亮各占3个。整个体系的设计体现了欧多克斯高超的数学技巧，他仅仅用匀速圆周运动就解释了多种天文现象，特别是行星的复杂视运动。欧多克斯的同心球体系贯彻了柏拉图的原则，是数理天文学的第一次可贵尝试。同心球理论是纯数学的构建，不涉及使真实天体运动起来的机理，也不追究这些球体是由什么形成的，它们彼此怎样在物理上相互适应，它们的动力从何而来。这些球体是数学上的球体，而在柏拉图主义者看来，这个系统是个理想的实在，而通过感官感知的星空则是一个不完美的复制品。

然而，整个体系还是不能完全地拯救现象。譬如，观测到的行星逆行轨迹形态多种多样，但是欧多克斯的“马蹄形”只能产生大致相同的曲线形状。同心球体系也不能解释一年中四季长度不等的观测事实—这一点已经被稍早于欧多克斯的希腊天文学家确认。另外，同心球体系也无法解释月亮和行星视亮度的变化。

一般认为月亮和行星的亮度变化是由于它们离开地球的距离在发生变化。但是按照同心球体系，所有的天体到地球的距离不会发生变

化。这一点也许是同心球体系作为一个拯救现象方案最终被放弃的原因。

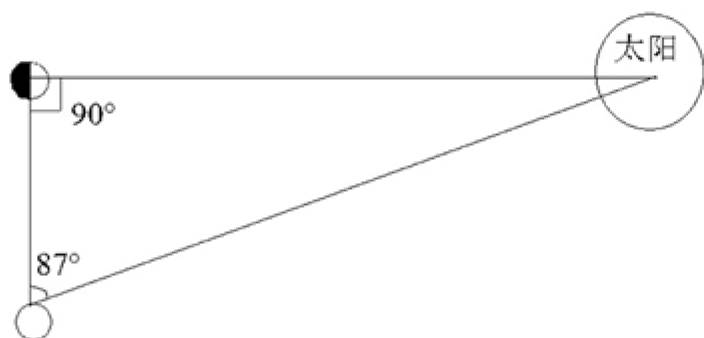


图2.11　阿里斯塔克利用弦月这个天象发生时日月地三者的位置关系，认为此时从地球上看太阳和月亮的视线夹角是87°，真实值是89°51'。

2.毕达哥拉斯学派的宇宙论

毕达哥拉斯（约570-496BC）出生在爱奥尼亚近海的萨摩斯岛，曾接受泰勒斯的建议游学埃及，后来移居意大利南部希腊殖民城市克罗顿。毕达哥拉斯一到克罗顿就创建了一个带有宗教色彩的秘密学派。这个学派最典型的特征就是对数最感兴趣，把数作为一个形而上学原则。传说毕达哥拉斯发现了2：1、3：2、4：3这几个数字比率跟最和谐的音程八度音、五度音和四度音一致。于是他推论出宇宙万物都能表示成和谐的正整数的比例。

毕达哥拉斯设想这些和谐的数字之比应该存在于世界中心到各天体的距离之间。由于这些比例也指音乐的音程，所以他认为音程也存在于天体中。由此引出了关于天体和谐的更为广泛的思辩学说。这种思想的影响十分深远，将会一直影响到哥白尼和开普勒形成他们的学说。

毕达哥拉斯主义脱离外在的形式强调纯粹的数，容易导出这样一种观点，即行星在天空中的复杂视运动可用种种简单运动的复合结果来解释。同时在考虑地球本身的问题时，可以不顾感官经验的证据，认为地球可能不是宇宙的不动中心。

实际上该学派后来的杰出学者菲洛劳斯（约480—385BC）就提出过一个地动学说，他认为地球和日、月、行星都绕着一团中央火运行。菲洛劳斯还认为太阳是一面大镜子，反射了中央火发出的光芒。菲洛劳斯无疑可以被看作是地动说的先驱，影响了后来的阿里斯塔克和哥白尼。

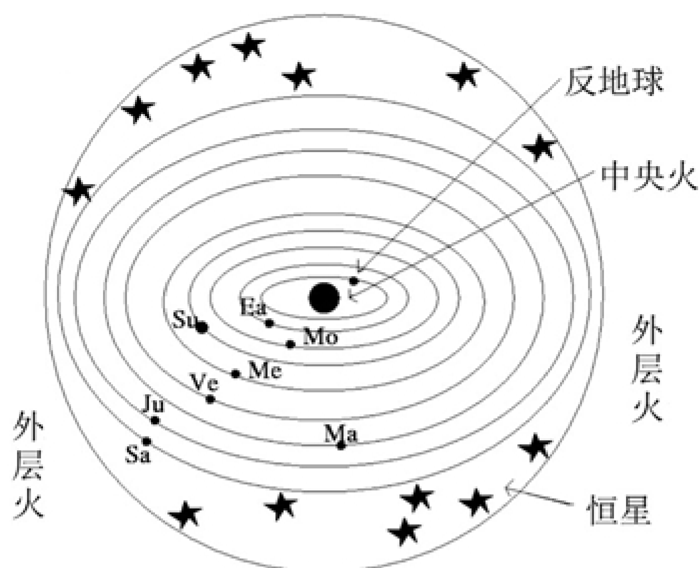


图2.3　菲洛劳斯的宇宙模型。

为了满足他对10这个数字的崇拜，菲洛劳斯虚构了一个反地球，位于中央火的另一侧。这样日、月、五大行星、太阳、恒星（被当作一个天体对待）和反地球，共有10个天体绕着中央火运行。

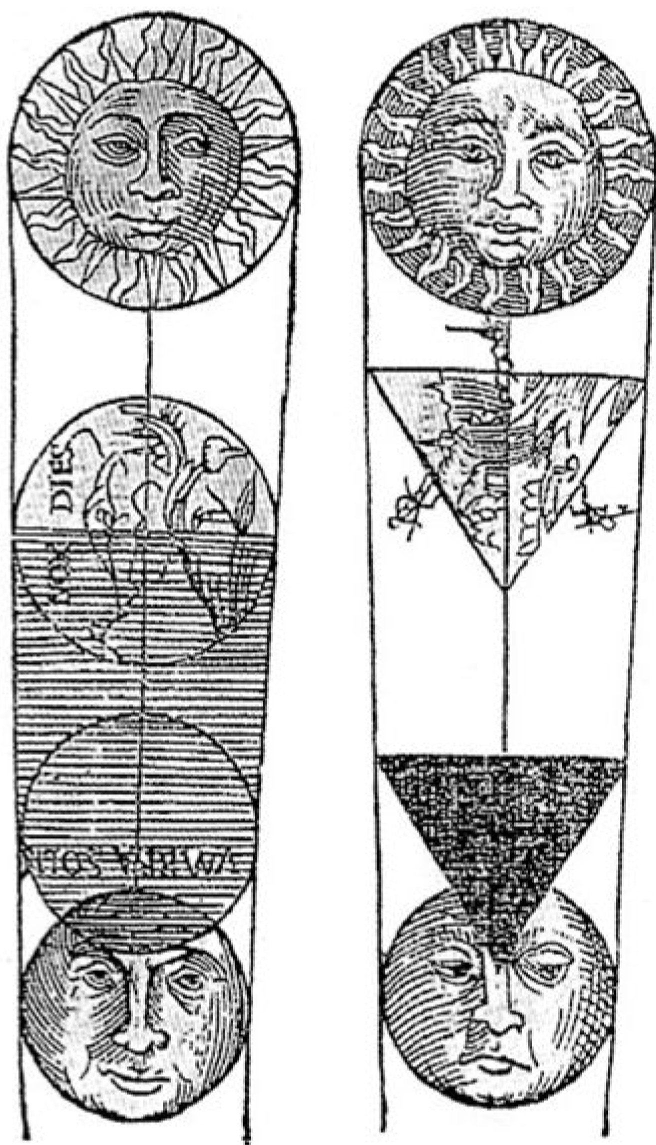


图2.4　球形大地论证之一。

16世纪的一幅木刻画，展示了希腊人的论证：月食时地球投影在月面上的阴影总是圆形的，表明大地是球形的；如果大地是三角形的，那么投射到月面的阴影也应该是三角形的。

关于大地的形状，毕达哥拉斯本人可能知道、他的门徒们则肯定知道了大地是球形的。他们对大地球形的论证是非常雄辩的：证据一是，出港的船在地平线处桅杆最后隐没；证据二是，人向南行，南天的星上升，北天的星下沉；证据三是，月食时投射到月面上的地球影子是圆形的。

6.希腊化时期的天文学

亚历山大大帝（356—323BC）的远征启动了希腊文明的一个新历史时期，史称希腊化时期。他建立起的庞大帝国虽然短暂，但把希腊的几何天文学带到了巴比伦的算术天文学面前，两者的结合诞生了卓有成效的希腊化天文学。

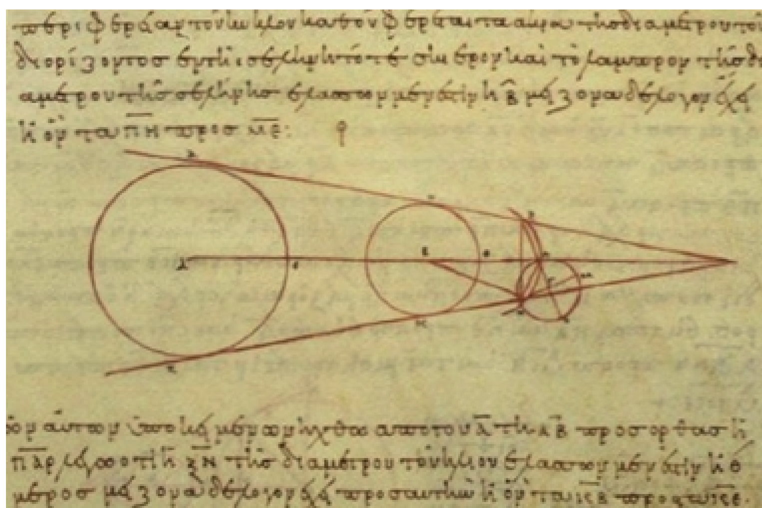


图2.12　阿里斯塔克证明过程中的插图。

希腊化天文学呈现出百家争鸣的繁荣景象，除了结出托勒密《至大论》这一硕果之外，还有阿里斯塔克、埃拉托色尼、喜帕恰斯等人的杰出工作。此时希腊文化的中心也从雅典转移到了亚历山大大帝建造的埃及港口城市亚历山大里亚。

萨摩斯岛的阿里斯塔克（约310—230BC）在一篇题为《论日月的大小和距离》的论文中向我们展示了希腊几何演绎推理的威力。文章开篇首先给出了6条假设：

1.月球的光来自太阳；

2.地球位于一球体中心，月球在该球上运动；

3.当月球上下弦时，将月球分为明暗两部分的大圆和我们的视线在同一平面上；

4.当月球上下弦时，月球与太阳之间的角距离比一个直角小其1/30；5.地球阴影的宽度为月球直径的2倍；

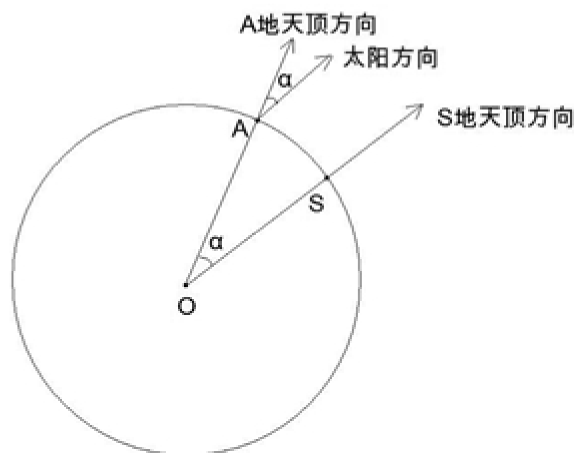


图2.13　埃拉托色尼注意到位于尼罗河上游的赛尼（今阿斯旺，图中的S点）地方夏至正午太阳光可直射入一口井内，同一时间在亚历山大里亚（图中的A点）测得太阳方向与天顶方向的夹角α为360°的1/50。而两地几乎在同一子午线上，因此角SOA也等于1/50×360°；而弧SA为地球周长的1/50。为了估算从亚历山大里亚到赛尼的距离，埃拉托色尼利用了骆驼商队的行进速度。骆驼队一天平均走大约100希腊里（stadia），从亚历山大里亚到赛尼大约须走50天，因此这段距离是5000希腊里。最后他经过一些修正，得到子午线上1°相当于地球表面的700希腊里，从而推得地球周长是252000希腊里。一般认为一希腊里等于157.5米，所以埃拉托色尼所求得的地球周长是39690公里。

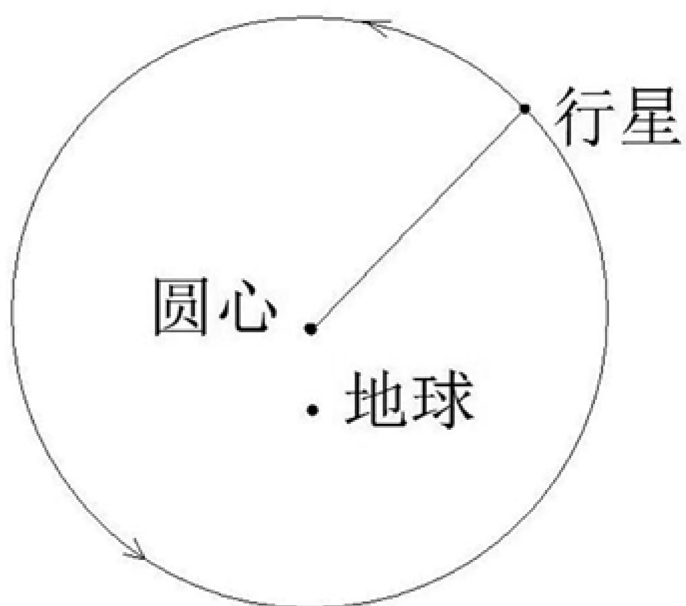


图2.14　偏心圆模型。

6.月球的视角直径相当于黄道上一宫的1/15。

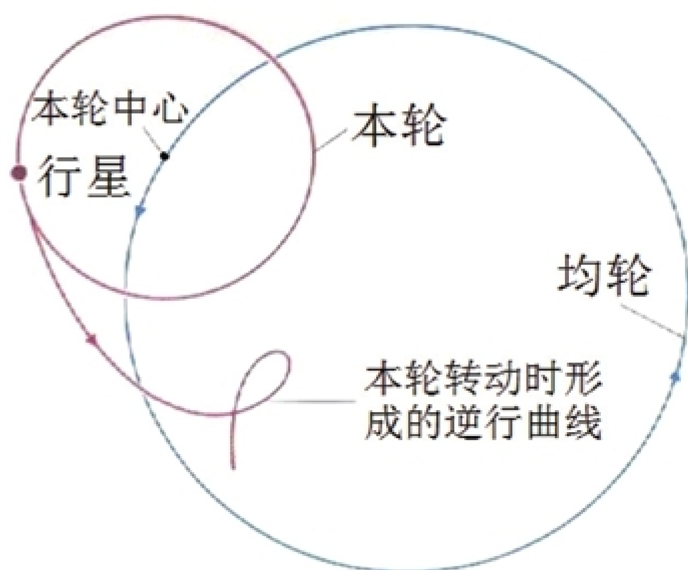


图2.15　本轮和均轮模型。

然后运用平面几何的基本原理，证明了18个命题，其中包含了以下三个结论性的命题：

1.太阳和地球间的距离大于地球到月球距离的18倍，但小于其20倍；

2.太阳与月球的直径比大于18，但小于20；

3.太阳与地球的直径之比大于19：3，但小于43：6。

虽然阿里斯塔克给出的基本假设中有几条数据的误差很大，导致结论与事实也相去甚远，但所获得的结论—如太阳是一个直径比地球大6、7倍，体积比地球大近300倍的球体—对人们日常的感觉经验已经形成了一个强烈的冲击。

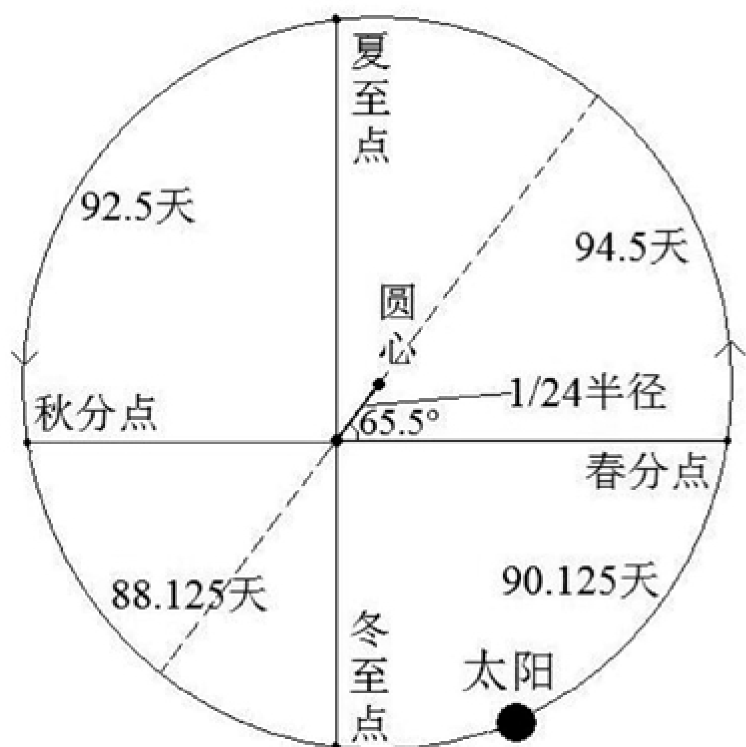


图2.16　喜帕恰斯的太阳运动模型。

鉴于太阳比地球大得多，而大的东西围绕小的东西转动不合常理，所以阿里斯塔克认为太阳应该位于中心，地球绕着太阳转动，而不是反过来。在这里，阿里斯塔克明确地把菲洛劳斯的中央火代之以太阳。

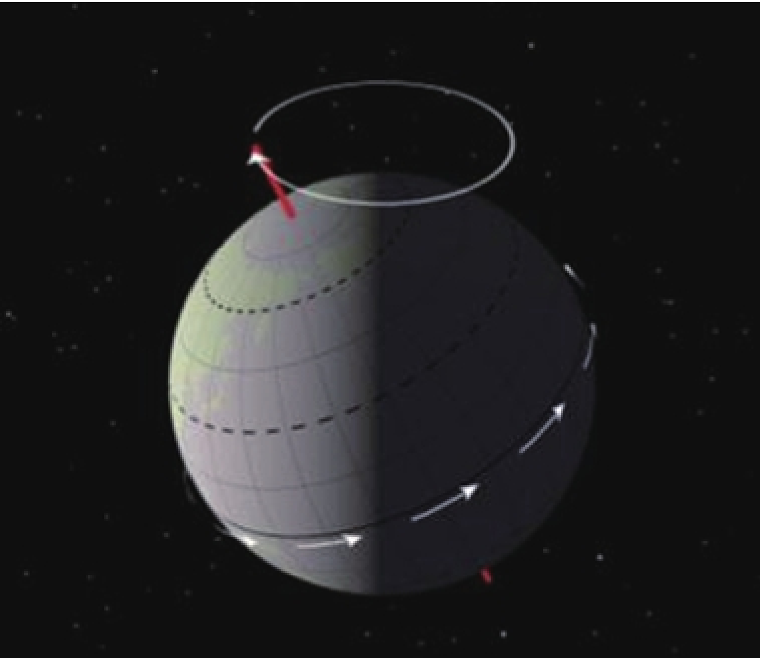




图2.17　天北极的圆周运动及其在星空中的运动轨迹。由于地球不是完美对称的球体，在日月等天体引力的联合作用下，其自转轴不能指向空间固定的一点，而是作周期性的转动，其周期为26000年。地球自转轴北端延伸交于天球上的一点被称为天北极，紧靠天北极的恒星叫北极星。显然，不同年代有不同的北极星。

阿里斯塔克就这样提出了第一个比较严格的日心地动观点，被称作是哥白尼的先驱。地动的观点会带来的一个问题是，如果地球绕太阳作周年公转，那么从地球上观测恒星，他们的视位置会有一个周年的变化，这就是恒星的周年视差。在当时的观测条件下，恒星的周年视差是无法观测出来的。对于应该产生的但没有被观测到的恒星周年视差，阿里斯塔克推测地球轨道半径与地球到恒星的距离相比是微不足道的。这一处理跟1700多年后哥白尼面临同一问题时所做的处理完全一样。

埃拉托色尼（约276—194BC）出生在昔勒尼（今利比亚），曾在柏拉图的雅典学院求学，后被埃及国王延请到亚历山大里亚，担任亚历山大里亚大图书馆的第三任馆长。他是希腊化时期最博学的学

者，他的众多成就中经常被人们提到的一项工作就是他提出了一种测算地球周长的方法，并获得了相当精确的地球大小。



图2.18　托勒密,16世纪《至大论》的卷首插画。

亚历山大大帝东征之后，希腊传统的天文学中融合了两河流域的天文学。两河流域的天文学注重从数值上探索行星运动的规律，来预报行星的位置。因此，尽管从“拯救现象”目的出发的欧多克斯体系淋漓尽致地体现了几何上的典雅，但希腊化时代的天文学家也再难容忍它与实测之间的偏差。

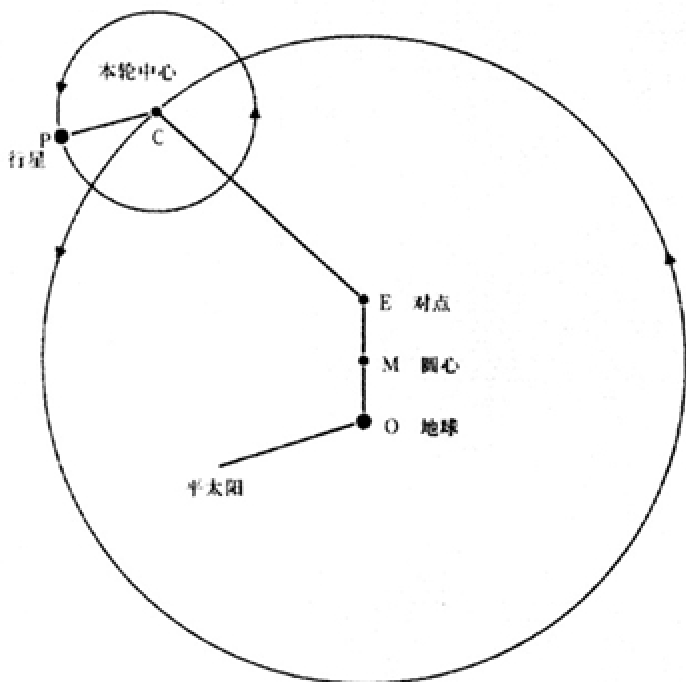


图2.19　托勒密的对点示意图。

以一部《圆锥曲线论》闻名于数学史的希腊化时期数学家阿波罗尼乌斯（约262—190BC）为用匀速圆周运动描述天体的运行提出了两种方案。在第一个方案中，行星绕地球作匀速圆周运动，然而地球并不处在圆周的中心，而是偏向一边。

在偏心圆上，行星依旧作匀速圆周运动。

但是因为地球不在圆心位置，所以从地球上看起来，行星的速度就会有变化。

在第二个方案中，行星在本轮上作匀速运动，本轮的中心则在均轮上匀速运转，地球位于均轮的中心。

阿波罗尼乌斯的偏心圆运动和本轮-

均轮模型这两个数学发明为天文学家解决行星视运动问题提供了基础，被喜帕恰斯（又译作伊巴谷，约190—127BC）用来描述天文现象。希腊天文学从此走上了一条康庄大道。喜帕恰斯在构建日月和行星运动几何模型时采用了巴比伦几个世纪以来保存的观测数据。他的太阳运动模型利用了偏心圆，很好地解决了四季长度不等与匀速圆周运动之间的矛盾。

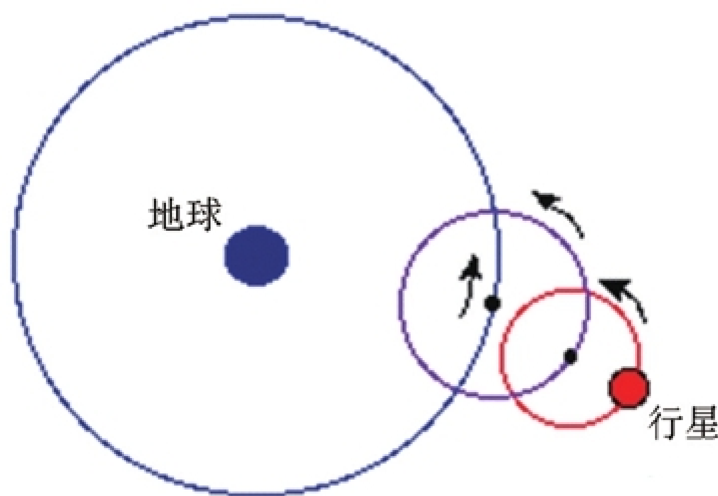


图2.20　从数学上存在这样的可能性：当一级本轮不足以预报精确的行星位置的时候，可以在其上增加一个次级本轮，乃至三级、四级本轮，直至获得足够的预报精度。但这样做需要付出的代价是极其繁琐的数学运算。有一种说法认为托勒密体系曾经被这样发展过，据说哥白尼看到的托勒密体系有多达80个本轮，以至于他要立志从简单性出发的改革。但也有学者，譬如欧文·金格里奇，认为历史上不曾存在过这样复杂的托勒密体系。

喜帕恰斯的另一项重要贡献就是发现了春分点的退行即岁差现象。由于黄经的计量起点春分点在缓慢退行，所以恒星的黄经读数也随着年代的增加而增加。喜帕恰斯就是通过比较前人的恒星观测数据和自己的观测数据之后才发现岁差现象的。造成岁差现象的物理原因，要等到1800年之后的牛顿才揭示出来。

7.托勒密和他的《至大论》

喜帕恰斯本人没有留下什么著作，他的理论由托勒密进一步精炼和发挥，并被写入了后者的集大成之作《至大论》中。

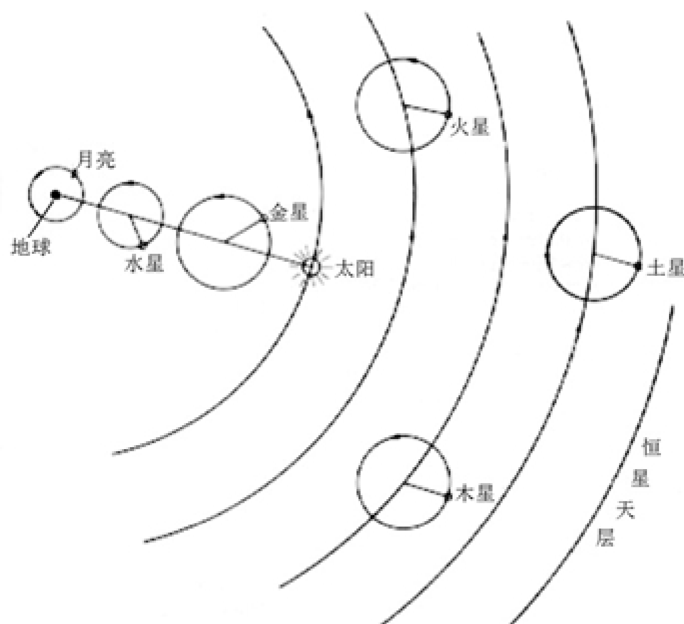


图2.21　托勒密体系中每颗行星都占据一个高度带，这些高度带相互之间既不重叠，也没有缝隙。托勒密测算得月亮的最大高度是64个地球半径，这个高度与下一个被水星占据的高度带毗连，他推测水星的最小高度也等于64个地球半径。既已知道水星本轮与均轮之比，他就可以推算出水星的最大高度。其值又等于金星的最小高度；依此类推，直到他最后将恒星天层置于最外层的行星土星的最大高度。托勒密就这样算出整个宇宙的半径是地球半径的19865倍。

托勒密从阿波罗尼乌斯和希帕恰斯那里继承了偏心圆、本轮和均轮，另外又引入一个重要的概念“对点”。他假定地球位于离开一个给定圆周之圆心有一定距离的点上，“对点”则为地球位置的镜像，位于圆心的另一边，该点与圆心的距离和地球与圆心的距离相等。然后他用这个点来定义圆周上的运动。圆周上的点不是以匀速运动，而是以变速运动，速度变化的规律是，让一个在“对点”上的观测者看来是匀速的。因此，“对点”的设置是对天体运动必是匀速圆周运动这一古希

腊原则的冒犯。但是显然，托勒密考虑得更多的是精确行星位置预报和数学上的便利，而不是真实与否的问题。

《至大论》大约写于公元145年，提供了宇宙的几何模型，并能对日、月和五大行星这七个天体的运动给出相当精确的预报。借助于《至大论》，数理天文学家和星占学家可以计算出未来任何时刻的行星星历表，在表中给出行星位置的黄经和黄纬值。

在《至大论》导言中托勒密论述了不能把地球看作是运动着的星体—从根本上说，这是来自亚里斯多德的物理学。

他承认从数学上可以把星空的周日运动看作是地球绕自转轴的周日运动的反映，但他坚持这在物理上来说是荒谬的。他的主要论据是：如果地球从西向东旋转，我们应该可以看到地球上所有的东西向西移动，而不应与地球紧紧相随。这条反驳意见是站在亚里斯多德错误的“惯性定律”基础上的。直到伽利略提出他的惯性定律之后，这条反对地动说的论据才被反驳回去。

《至大论》第一卷的最后几章论述了希腊测量学和三角学原理。在准备了必要的数学工具后，托勒密在第一卷和第二卷的其余部分论述了球面天文学的所有内容。第三卷论述太阳的运动，利用了偏心圆运动的概念来解释四季长短不一的原因。第四、第五卷讨论月球运动。第六卷描述日食和月食。第七、第八卷给出了包括有1022颗恒星的星表，给出了每颗星的黄经和黄纬及亮度，还讨论了喜帕恰斯发现的岁差。第九到第十三论述了五颗行星的运动。

对于整个宇宙，托勒密最终给出了如下的图景：地球静止于宇宙的中心（或中心附近），从里到外依次是月亮、水星、金星、太阳、火星、木星和土星等天球层携带着各个天体绕地球运转，最外围是不动的恒星天球。

无论如何，与阿里斯塔克只提出日心地动说的想法不同，托勒密的《至大论》提供了一套预推日、月和五大行星在天空中精确位置的几何模型。它的成就达到了几个世纪以来希腊天文学家为“拯救现象”而付出的努力的顶点。

然而托勒密体系自身带有的缺陷也从它问世之后便成为天文学家议论的对象。

托勒密为解释火星、木星和土星的运动而引入的对点，导致行星不是相对于均轮中心而是相对于对点在圆周上做匀速运动。

这种做法牺牲了自古希腊以来一直坚持的信念：行星作完美的匀速圆周运动。后来阿拉伯天文学家试图取消“对点”，直到哥白尼才成功做到。另外，按照托勒密的月亮运动模型，月亮在其本轮上运动时到地球的距离有将近两倍的变化，其视大小则应该有4倍的变化，但

这与观测事实不符。托勒密为解释金星和水星的视运动而引入的“日地连线”特设也一直困扰着一些天文学家。要消除这些深深嵌入到体系内部的缺陷，一直要等到整个体系被抛弃之日。

第三章 中国古代天文学

根据中国古代各种典籍对“天文”一词的使用情况，它包含两个方面的含义：一方面，“天文”是指天象，包括天体运行所呈现的景象和与天体本身有关的现象；另一方面，“天文”是这样一门大学问，它根据天象的变化，预卜吉凶，为帝王行事提供指导，这一点与星占学的功能比较接近。因此，中国古代的“天文”与作为现代学科之一的天文学在本质上有所差别，然而在研究对象和研究手段方面两者在一定程度上是相通的。

1.官营传统两千年

在中国古代，天文观测、历法编制等天文活动由专门的机构负责运作。这种专门的天文机构是中央政府的一个部门，其负责人及工作人员，既是天文学家也是政府官员。历代天文机构的名称常有变动，大致在隋代以前叫做太史令、太史局或太史监。唐代前后分别叫过太史局、浑天监、浑仪监、太史监、司天台等。宋元之际叫做司天监、司天台或天文院。明清两代基本叫做钦天监。历代天文机构的人数颇有出入，没有定数。多则数百人，少则几十人。天文机构工作人员进行观天的地方，在古代一般叫做灵台或观象台。由于历经岁月和战火的洗礼，这样的古代观天遗址留下的已经不多。

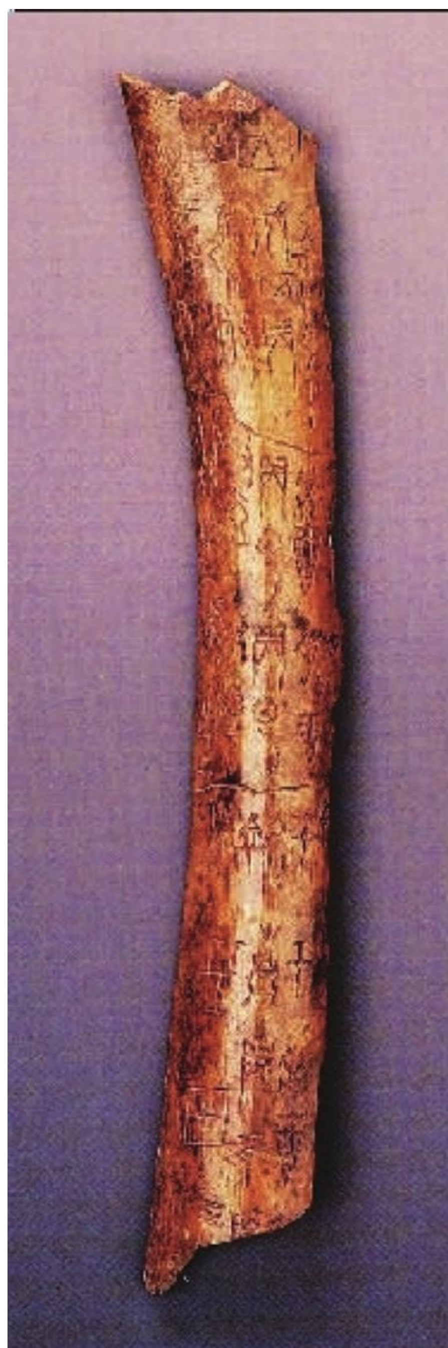


图3.1　东汉灵台遗址，位于河南偃师汉魏洛阳故城南郊，始建于东汉光武帝建武中元元年，沿用到西晋，毁于西晋末年的战乱，遗址范围约44000平方米，中心建筑是方形夯筑高台，其基部长宽各约50米，现仍高出地面8.45米，是我国现存最早的一座天文观测台遗迹。

中国古代专职天文机构的一个重要职责就是观测和记录天空中发生的一切变化。由于中国古代由政府专门供养专职的观天人员进行天象观测和记录，所以中国古代保存下来了世界上持续时间最久、内容最为丰富详尽的天象记录，就不足为怪了。中国古代史籍中记载的天象记录，从类型上大致可以分为日食、月食、掩星等特殊天象；与行星有关的天象；彗星、新星、流星和太阳黑子等异常天象。



图3.2　北京古观象台，始建于明正统七年即公元1442年，持续了近500年的天文观测，是世界上在同一地方观测时间最长的天文台。观象台台体高13.75米，台上陈列着八架清代铜质天文仪器。



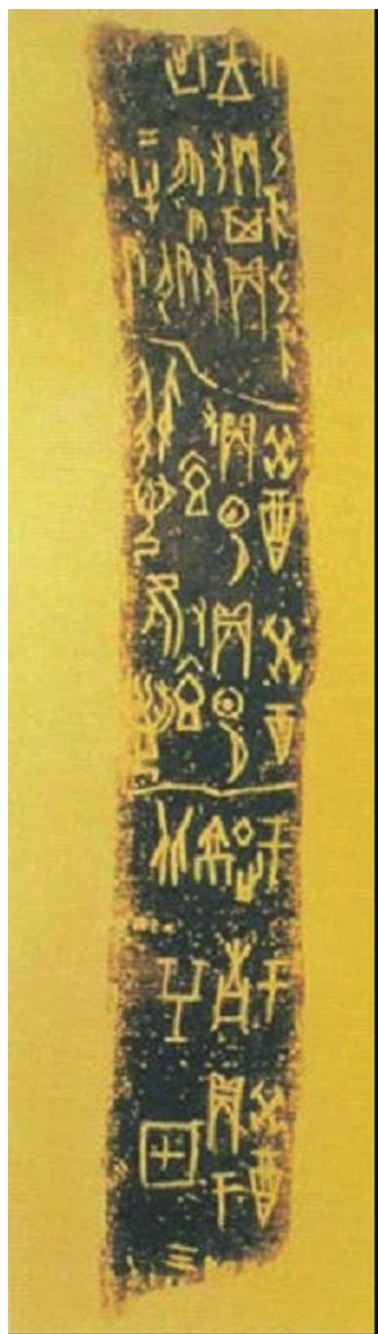


图3.3　癸酉贞日夕有食卜辞原件照片和拓片。

利用天文仪器对恒星、日、月、行星等天体进行定量观测，掌握必要的基本数据后推演出各天体的一般运动规律。这一系列复杂而精密的推算工作的最后一步就是历书的编算，历书的编算是皇家天文机构的职责所在。历书的印制也是皇家天文机构的工作内容，并且是被皇家天文机构垄断的。

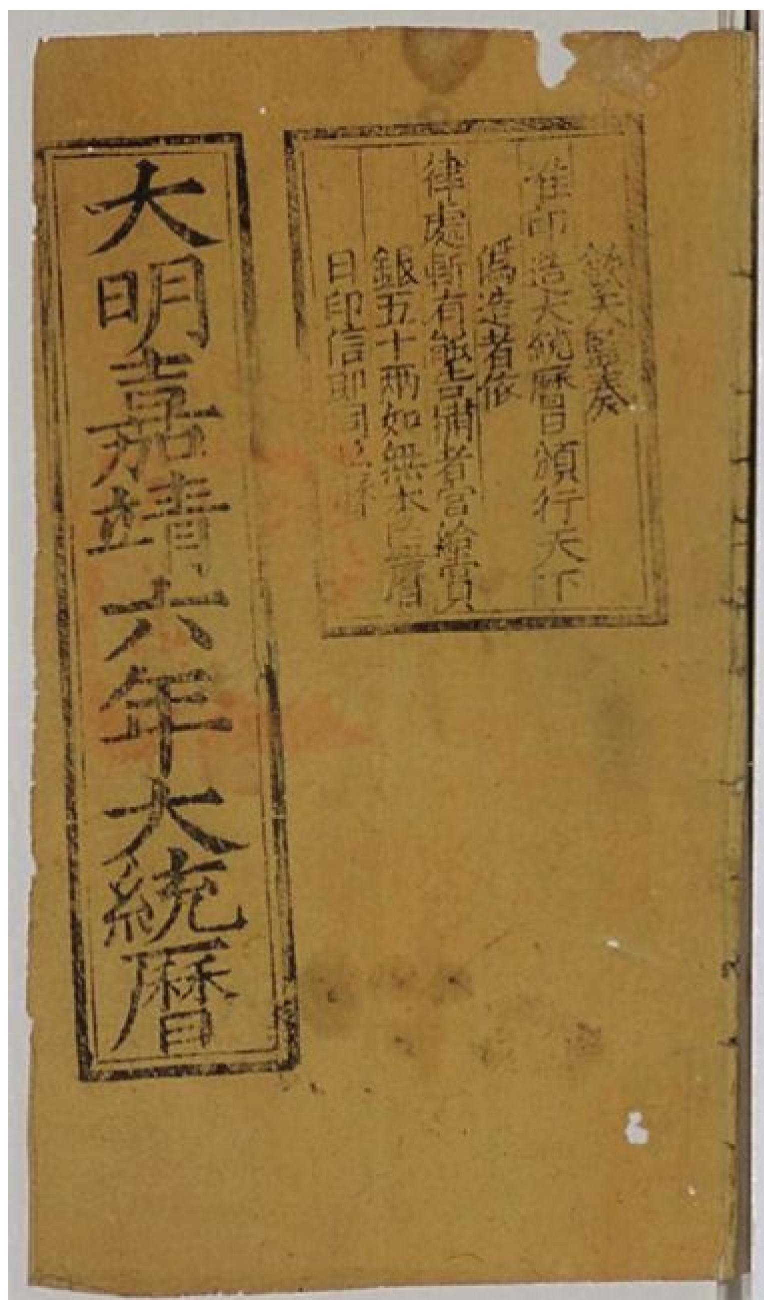


图3.4　在现存明代《大统历》历书的封面上，可以看到一个盖上去的木戳，戳上的文字为：钦天监奏准印造大统历日，颁行天下。伪造者依律处斩。有能告捕者，官给赏银五十量。如无本监历日印

信，即同私历。”

历书的颁发具有非常重要的政治象征意义，表现在两个方面：一方面颁历之权是皇权得以确立的象征；另一方面，奉行某朝颁行的历法，表示对该朝政权的臣服。因此颁发历书成了朝廷大事，要举行非常隆重的仪式。根据《明实录》中的记载，明朝的颁历仪式由刘基等人议定，面的柱体，最简单的表可以是一根木棍；力求隆重。颁历的时间有季冬、冬至等旧圭比表稍晚才出现，它是一把标有刻度的例，后来改为十一月朔日。如果该日正好长尺，正南北方向水平放置，一端与表在遇到日食或冬至，则颁历日期前置或后地面的一头连接。表用来投射日影，圭用延。颁历的地点在正殿。参与颁历的人员来测量日影的长度。

自天子以下有诸亲王和文武群臣。所有参根据《周礼·考工记》和《周髀算经》与颁历的人员都会得到一本来年的新历。

等早期文献记载，圭表一开始便被用于另外礼部还负责向全国布政司转发民用定方向、定节气等天文上的用途。《周髀历，这种民历式是最为简略的一种，与皇算经》规定表高为八尺，表影长一尺六寸帝、亲王和大臣所见的历书繁简不同。

时为夏至，这里测影时间在正午，地点在作为宗主国，颁历于天下的同时，也周代所认定的地中阳城。值得注意的是，向周边附庸国颁发历书，以显示其宗主国自从周代定下表高为八尺之后，以后历代的地位。在唐朝，南诏、回鹘等国都从唐沿用，所造表高大多为八尺。

朝接受历书。明朝一般在每年十一月朔颁由于用圭表测影可以定出编历所需要历之后，接着就向附属国颁历。朝鲜当时的重要参数，所以历代对圭表的制作力求奉中国为宗主国，明朝每年赐历100本。琉精善，以期提高测影精度。元朝郭守敬为球国远在海外也奉明朝正朔，但由于路途修《授时历》，首次打破了表高八尺的定遥远，进京不易，受历之使臣回到琉球时历书往往已经过期三四个月。琉球国王曾将此事反映到大明天子那里，后来明英宗想出一个解决办法，让福建布政司负责给琉球国颁发历书。

2.天文仪器和典籍

天文仪器的出现是天文学走向定量化的必然结果。只有借助于各种天文仪器才能精确测定各种天文数据。中国古代的天文仪器主要有圭表、漏刻、仪象三大类。

圭表是一种既简单又重要的测天仪器，它起源于远古，直至清末，在中国古代天文学的发展史上扮演了重要角色。圭表由表和圭两部分组成，表是一种竖立于地面的柱体，最简单的表可以是一根木棍；圭比表稍晚才出现，它是一把标有刻度的长尺，正南北方向水平放置，一端与表在地面的一头连接。表用来投射日影，圭用来测量日影的长度。

根据《周礼·考工记》和《周髀算经》等早期文献记载，圭表一开始便被用于定方向、定节气等天文上的用途。《周髀算经》规定表高为八尺，表影长一尺六寸时为夏至，这里测影时间在正午，地点在周代所认定的地中阳城。值得注意的是，自从周代定下表高为八尺之后，以后历代沿用，所造表高大多为八尺。

由于用圭表测影可以定出编历所需要的重要参数，所以历代对圭表的制作力求精善，以期提高测影精度。元朝郭守敬为修《授时历》，首次打破了表高八尺的定制，建造了四丈高表，并创造景符、窥几等专用测影附件，使测影精度大大提高。

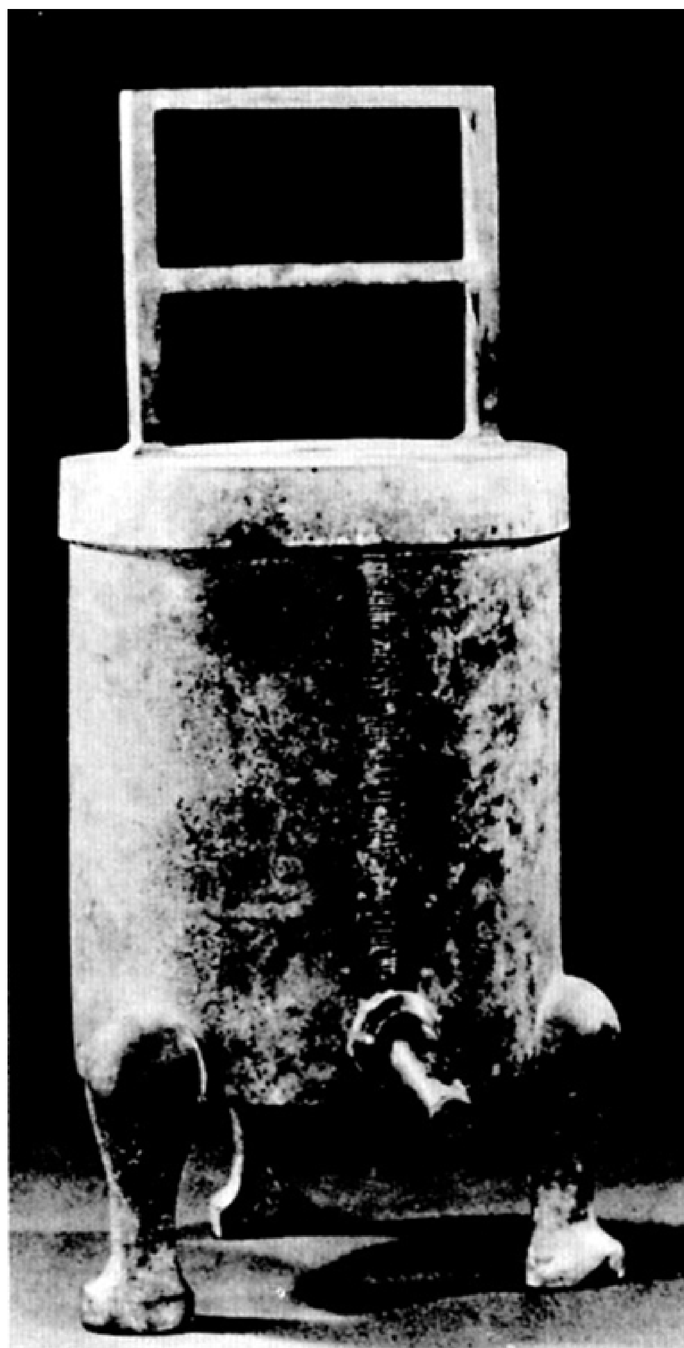


图3.5　明代圭表。现陈列于南京紫金山天文台。



图3.6河南登封观星台的郭守敬高表。

漏刻是古代最重要的计时仪器。漏刻由漏和刻两部分组成，漏指漏壶，刻是标有时间刻度的标尺，一般是一支竹箭。漏刻根据漏壶中的水量变化来确定时间。日晷根据太阳投影的方向变化来计时，但是到了晚上和遇到阴雨天日晷就无能为力了，漏刻计时则不受这些因素的影响。



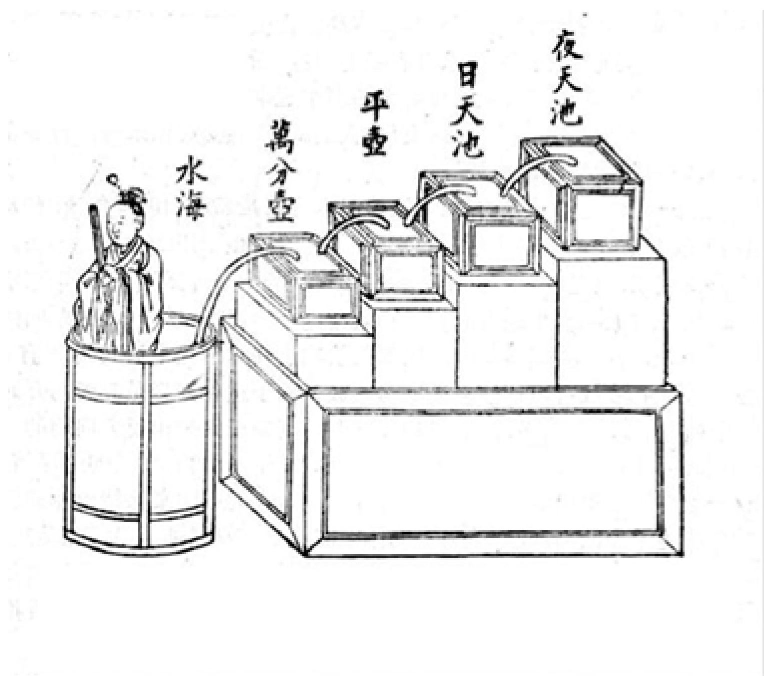


图3.7泄水型漏壶（上）和受水型漏刻（上）。



图3.8　明代浑仪。现存南京紫金山天文台。

漏刻计时的方法主要有两种，一种是根据容器内水漏出而减少的情况来计时，这叫泄水型漏刻；一种是根据容器接受另外容器漏出的

水而水量增加的情况来计时，这叫做受水型漏刻。为了提高用漏刻计量时间的精度，古人想了许多办法来获得均匀的水流，以保证漏刻计时的稳定性。计量时间的装置也越来越复杂，从简单的泄水型发展到受水型，乃至多级受水型装置。在这一点上中国古人再次展现了他们的聪明才智。



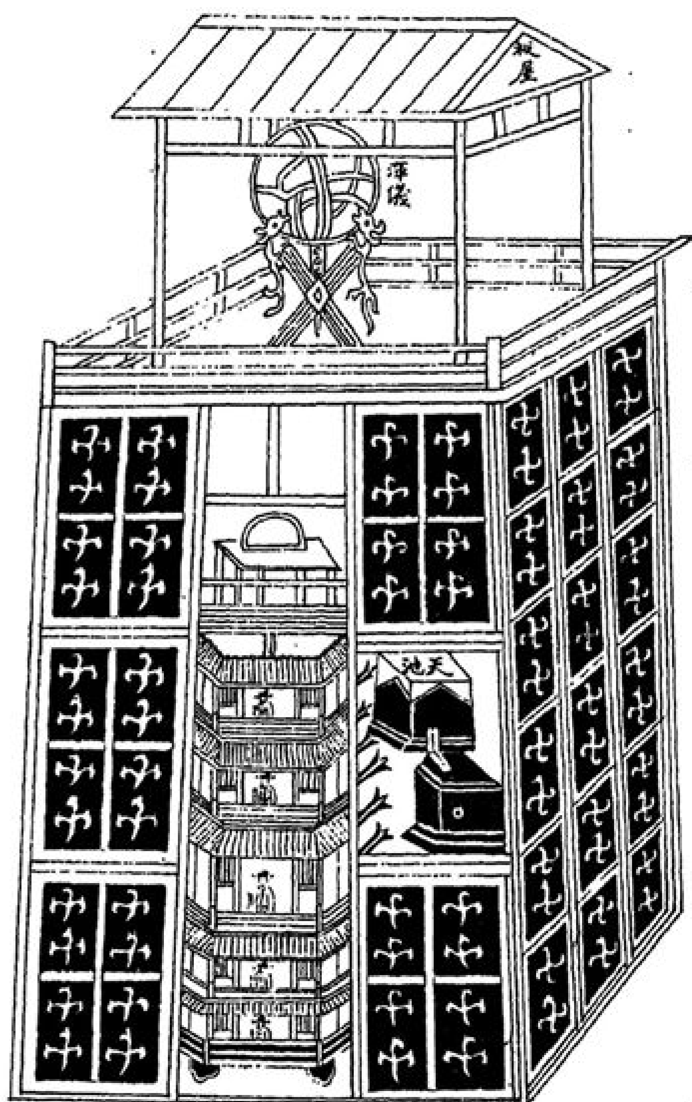
图3.9　明代仿制的郭守敬简仪。现存南京紫金山天文台。



图3.10　明代浑像。现存南京紫金山天文台。

仪象分为浑仪和浑象两类，是中国古代浑天家测候和演示天象的基本仪器。从各种文献的记载来看，浑仪最早创制于汉代，与浑天说

的产生密切相关。《隋书·天文志》对东晋时期前赵史官孔挺于光初元年（323）所造的浑天铜仪结构有较为详细的介绍。以后北魏、唐、北宋、元、明等各代均有所制。



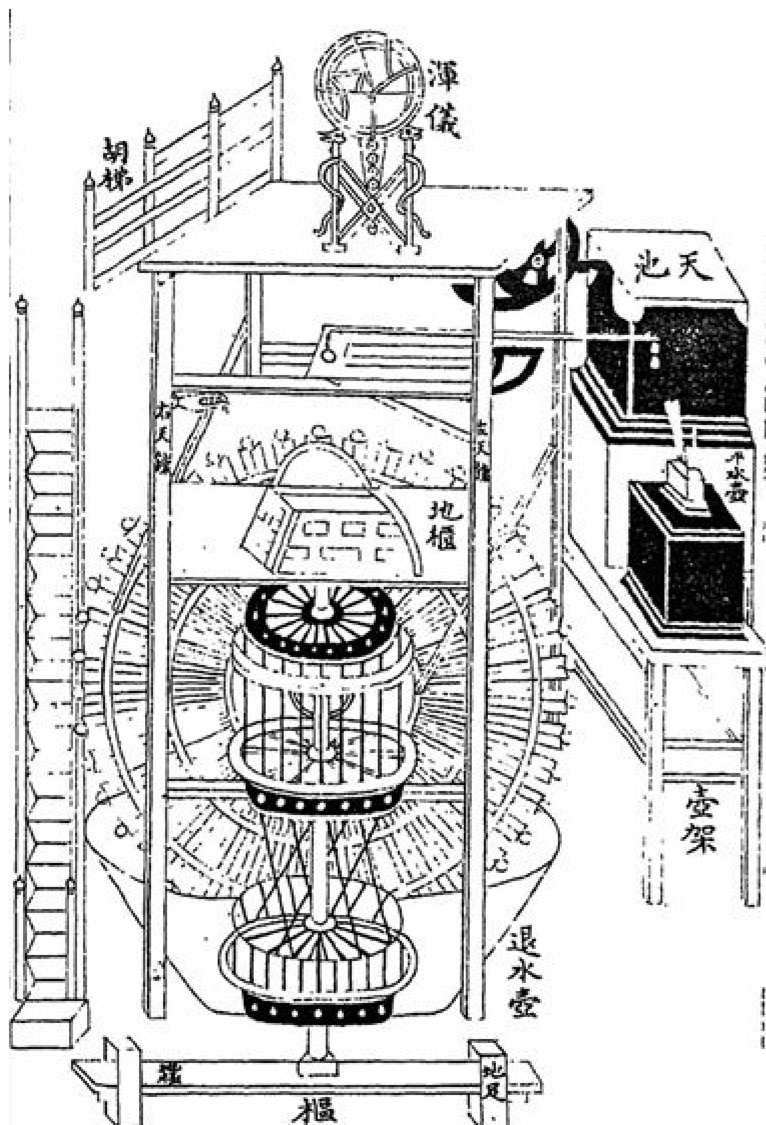


图3.11　《新仪像法要》中记载的水运仪象台外观（上）和内部结构（下）。整座水运仪像台高约12米，宽约7米，共分三层，最上层设置浑仪且有可以开闭的屋顶。中层安置浑象。下层是报时系统。这三部分用一套传动装置和一组机轮联接起来，用漏壶水冲动机轮，带动浑象和报时装置一起转动。可通过控制水流速度来调节枢轮向某一方向等时转动，使浑象的转动与天体运动保持同步。在中层密室中的观测者看到浑象上演示某一恒星上中天，另一观测者在上层可用浑仪观测加以验证。在下层报时装置中巧妙地利用了160多个小木人和

钟、鼓、铃、钲四种乐器，可以显示时、刻，还能报昏、旦时刻和夜晚的更点。

唐初李淳风制造的浑仪叫浑天黄道仪，比前代浑仪有很大改进。唐开元十一年（723）一行、梁令瓒制成黄道游仪，比李淳风的浑天黄道仪又有所改进。北宋浑仪先后制造了五架之多，在结构上继续有所改进，在铸造技术和质量上也达到了浑仪制造的高峰。元代郭守敬针对浑仪结构的缺陷作了一次革命性的改进，他把浑仪分解成两个独立的仪器，安装在同一个底座上，合称间仪。间仪的结构比浑仪更为先进合理，铸造更简单，用于测天也更方便易行。

历代之所以不惜工本地铸造浑仪，是因为浑仪在天文历法中具有重要作用。实测是天文学得以发展的基础，历史上每一次测天仪器的改进，几乎都伴随着天文历法理论的一次进步。

浑象是古代浑天家用来演示天球周日运动的仪器，类似于现代的天球仪，其基本结构是一个圆球，在球面上标有星辰和黄道、赤道等圈线。浑象首次出现在张衡的作品中（公元132年）。

据说张衡通过巧妙的设计，利用漏壶流水的稳定性，推动浑象均匀绕轴转动。

调节浑象的转动速度，可以使浑象显示的天象与真正的天象完全符合。后人沿着张衡这条技术路线，不断改进设计，到北宋苏颂领导建造的水运仪象台，达到了空前宏伟、复杂的程度。

水运仪象台由苏颂和韩公廉于宋元祐元年（1086）开始设计，到元祐七年完工。水运仪象台中的机械传动装置，类似现代钟表的擒纵器，被英国的李约瑟认为“很可能是欧洲中世纪天文钟的直接祖先”，但也有学者对李约瑟的这种说法表示怀疑。水运仪象台在公元1127年金兵攻陷汴梁时遭到破坏。南宋朝廷曾经试图想把水运仪象台恢复起来，始终没有成功。

在世界各古代文明中，中国古代保存的天象资料最为丰富和完备，这一点是举世公认的。这些古代天象资料主要是通过编成书籍的形式得以保存。

中国古代最系统、最完整、记载资料最丰富的天文典籍当首推历代官史中的天文、律历、五行等志。自从司马迁作成中国古代第一部纪传体通史《史记》后，《史记》体例也成为后世史官遵循的楷模，历代官史中的天文、律历、五行等志便是仿照《史记》“八书”中的律书、历书、天官书写成的。

历代官史中的天文、律历、五行等志中保存的天文历法史料以其正统性、完备性见长，除此之外，其他有关书籍中保存的天文史料对于我们全面了解天文历法在古代的真实情形也很有帮助。这些典籍根

据它们各自的特点可分为三大类：一是上古经史类，二是个人著述类，三是古代由官方组织编撰的天文著作和大型类书中的天文历法部分。

天文典籍在中国古代原则上一直处于“禁书”的状态，非专业人员不得阅读。但是针对官修史书中的天文志和律历志，则一直处于比较暧昧的状态，因为朝廷毕竟不能禁止读书人阅读《史记》、《汉书》。

由于中国古代天文学的官方垄断经营的性质，给天文典籍文献的保存也带来正反两个方面的影响。一方面由于官方大量人力物力的投入，使得天文文献得到大量保存；另一方面，由于官方禁止私人自学天文和拥有天文著作，许多天文文献的保存渠道少而窄，缺乏广泛传播和流通的渠道，减少了被保存的机会。事实上，由于官方的集中保存，常常因为战乱和火灾等原因使得很多天文典籍毁于一旦。

3.历法的基本问题

汉代以后史籍所载中国古代历法前后有100余部，其中获得官方正式颁行的有50余部。各部历法在内容和方法上有承袭也有变革，绵绵两千余年，作述不止，蔚为大观。

历法在古代称为历或历术，在概念内涵上古代历法比现代历法更为丰富。古代历法研究的对象包括日月和五大行星，要解决的基本问题包括：一、年月日之间的协调问题，具体地说包括每月日数的分配、一年中月的安排和闰月的安插、节气的安排等等；二、对日月五星运行规律的掌握，进而对日月交食和行星动态进行解释和预报。

年、月、日是历法中三个最基本的时间单位，根据不同的定义，年、月、日的具体含义也有所不同。民用历法中的年、月、日一般指回归年、朔望月和平太阳日，平太阳日是昼夜交替的平均周期，朔望月是月相变化的平均周期，回归年是太阳从春分点再回到春分点的时间间隔，或太阳从冬至点再回到冬至点的时间间隔。早期历史上年的概念与物候变化有关，如《说文》“年，熟谷也”之类。

月亮的朔望交替变化和太阳的周年视运动是两种既直观又较为精确的周期运动，选择其中任何一种都可以来制定历法。由于选择的不同，中外历史上出现了三种类型的历法：阴历、阳历和阴阳历。

阴历只考虑月亮的运动，以朔望月为基本周期，并规定12个朔望月为一年，如伊斯兰教的历法就是阴历。阳历以太阳的周年运动为依据，不考虑月亮的运动，如现行的公历就是阳历。阴阳历则同时考虑月亮和太阳的运动，把朔望月和回归年并列为制历的基本周期，我国古代文献所载的历法几乎都是阴阳历。

中国古代历法一年长度定为365日加上若干余分。月分大小，大月有30天，小月29天。平年有6个大月和6个小月即354天，这样一回归年的天数比12个朔望月的天数多了11天多，累计3年就多出一月多。阴阳历同时考虑月亮和太阳的运动的目的就是要使季节变化（太阳运动的反映）与阴历年协调一致，比如使阴历年首固定在春季。对以上问题的解决归结为古代历法中一个比较重要的专题：闰月的安插。从一些古代文献来看，古人很重视置闰，《尚书·尧典》有“以闰月定四时成岁”的说法，《左传·文公六年》也有“闰以正时”的记载。古代较早出现的闰法有“五年再闰”（《说文解字》），就是说五年中安插两个闰月，这个安插闰月的周期又叫闰周。五年中安插两个闰月仍不能使阴历和阳历协调一致，积累五年阴历比阳历多四天多，所以

后来又出现了“十九年七闰”的闰周。这样，19年中有235个朔望月，6939.6910天。19个回归年有6939.6018天。两者的天数已经相差很小。“十九年七闰”这一闰周在中国古代历法史上使用了较长时间，直到南北朝时北凉赵匪欠打破这个旧闰周，创用600年221闰；稍后南朝宋祖冲之创用391年144闰。

朔望月和回归年分别是月亮运动和太阳运动这两种独立运动的周期，两者之间没有简单的数学关系，而闰周为两者强制性地确立了一种简单的数学关系。随着观测精度的提高，对朔望月和回归年长度的确定越来越精确，闰周的存在就显得越来越不合理，南朝宋时何承天就已经主张不必在探求新闰周上下功夫，到唐朝开始不再推求新闰周。

闰月安插在年中的什么位置，也有个逐渐进步的过程。早期历法闰月一般放在年终，称为“十三月”，自汉《太初历》起，确定了无“中气”之月为闰月的置闰原则。

采用二十四气是中国古代历法的一个主要特点，它属于阴阳历中的阳历部分，反映了太阳的周年运动。在西周和春秋时期，人们通过用圭表测日影的方法确定了冬至、夏至、春分、秋分四气在年中的位置；《吕氏春秋》中已增加了立春、立夏、立秋、立冬四气；《淮南子·天文训》中已出现了完整的二十四气名称，它们的名称以及与十二月的对应关系为：

一月　立春、雨水

二月　惊蛰、春分

三月　清明、谷雨

四月　立夏、小满

五月　芒种、夏至

六月　小暑、大暑

七月　立秋、处暑

八月　白露、秋分

九月　寒露、霜降

十月　立冬、小雪

十一月　大雪、冬至

十二月　小寒、大寒

以上二十四气又分为两类，立春、惊蛰、清明等为节气，雨水、春分、谷雨等为中气，节气和中气间隔排列。在历法计算中，以中气

冬至为气首，在民用上节气立春是年首。

一气的长度是一回归年的二十四分之一，即15.2184天，一个节气加上一个中气的长度（30.4368天）大于一个朔望月的长度（29.5306天），所以有可能在一个朔望月里只出现一气（只有节气或只有中气）。如果某一个朔望月里只有节气没有出现中气，那么就把该月设定为闰月，如果前一个月份序号为×，那么该月为闰×月。汉代以来的历法就一直延用无中气之月为闰月的置闰规则。





图3.12　商帝乙或帝辛时期刻有干支表的牛骨（上）和干支表拓片（下）。

中国古代还有一些特殊的纪日和纪年方法。纪日用干支，干即天

干，为甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸；支即地支，为子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥。十天干和十二地支组合成六十干支，也称六十甲子。完整的六十干支符号在殷墟甲骨卜辞中就已出现，连续的干支纪日则从鲁隐公三年（720BC）二月己巳日起，直到现在未有间断。至于鲁隐公三年以前的干支纪日有无间断还有待于考证。

干支纪日是一种独立的纪时方法，在年代学上具有重要意义。

关于纪年，有一种岁星纪年法，根据木星大约十二年运行一周天的规律，将周天分成十二次，自西向东依次为星纪、玄枵、诹訾、降娄、大梁、实沉、鹑首、鹑火、鹑尾、寿星、大火、析木等，木星每年行经一次，因此就可以用木星所在的星次来纪年，这种纪年法在春秋、战国之交十分盛行。

岁星实际上是11.86年运行一周天，经过84年，岁星的实际位置将超过计算位置一个次，因此岁星纪年法行用时间过久之后，就与实际天象不符，所以后来岁星纪年法逐渐被干支纪年法所代替。西汉太初元年（104BC）以后，岁星纪年法一度与干支纪年法并用，东汉建武三十年（54年）后则完全废除了岁星纪年法，只用干支纪年法。

与干支纪日法类似，干支纪年法也是以六十干支循环使用，其十干叫做岁阳，十二地支叫做岁阴。干支纪年法与干支纪日法一样，是独立于天象的，可以循环往复地使用。中国古代历史上皇帝年号更替频繁，又由于改朝换代，历法也经常变革，但历史上的年月日仍然能搞得清清楚楚，这正是古人不间断地使用干支纪日和干支纪年这两种自成体系的纪时方法的结果。

4.中国古代的宇宙学

中国古代的宇宙学说也可分为宇宙创世学说和宇宙结构学说两部分。中国古代关于宇宙创世的学说，与神话传说和哲学思辨混杂在一起，还很难说得上是一种具有数理内容的科学宇宙学说，但这些古代宇宙创世学说无疑也反映了中国古人对于宇宙是怎么来的这个问题的严肃认真的思考。

一种在古代比较流行的神话是说自盘古开天辟地之后宇宙得以创生。盘古开天辟地的神话故事是相对晚出的，在此前的一些先秦和两汉的文献如《老子》、《淮南子·天文训》、张衡《灵宪》当中，对宇宙的创生有更多偏哲学思辨性的描绘。

秦汉之后，思考宇宙创世的仍不乏其人，如朱熹认为天地是阴阳二气磨出来的。并且在他的论述中，虽然没有明确说明地与天相比在尺度上是否可以忽略不计，但俨然有西方地心说的影子了。

关于宇宙是否必然有一个创世，这在中国古代也不是没有疑问的。如明代董穀认为对某一个宇宙，譬如我们生存于其中的宇宙，它是有始的。但对于由无限多这样的宇宙组成的宇宙系统来说，却是无始的。明代王夫子则明确提出了宇宙无始无终、不生不灭的观点。这大致与西方现代宇宙学说中的稳衡态宇宙学说暗合。

随着古人天文知识的积累，开始对天地的结构、天体的存在和运动等提出各种理论，试图对常见的天文现象加以系统化的一致的解释。大概到汉代，中国古代形成了三家主要的宇宙学说，即盖天说、浑天说和宣夜说。

盖天说在大约成书于公元前100年左右的《周髀算经》中得到描述。关于盖天说的天地结构具体为何，历代学者也众说纷纭，现在基本考定为：天与地为相距八万里的平行平面，在北极之下大地中央矗立着高六万里、底面直径为二万三千里的上尖下粗的山峰。天始终与地保持相同的形状。太阳绕北极而转，一年四季有不同的运行轨道，称为“七衡六间”；太阳光照的范围是有限的，为十六万七千里。照着阳光的地方是白天，照不到阳光的地方是黑夜。据此模型，盖天说可以解释昼夜的交替和四季的变换。

盖天说提出之后，不乏质疑之声。大约到了西汉末年，浑天说思想开始形成，浑天说持有者开始对盖天说的缺点展开严厉的批评。其中扬雄提出了著名的《难盖天八事》。扬雄按照盖天说的原理和思路，推出了与事实不符合的八条。譬如其中第六条提出：按照盖天说

的说法，太阳随天绕北极平转，那么在高山上望日出，太阳不应该从水下升上来，而是应该由远而近仿佛从一面树立的镜子中破镜而出的样子。

扬雄之后，桓谭、郑玄、蔡邕、陆绩等学者各自对《周髀算经》中的盖天说进行了批评，认为与实际情况多有不符。与此同时，浑天说已经慢慢形成，并占据了主导地位。

一般认为浑天说的形成稍晚于盖天说。对浑天说作最完备叙述的被认为是东汉张衡所作的《浑天仪注》（约123年），可归纳为以下几个要点：

1.天与地是尺度相近的球形，天包地。

2.以北极为天体绕转的中心。

3.使用二十八宿体系记录和描述日月五星的运动，周天被分为三百六十五度又四分之一度。

4.基本测量仪器是浑天仪。

东汉以后浑天说基本上是中国古代的标准宇宙模型。这里还有一点需要提醒的是，“浑天如鸡子”的说法常被解读为浑天说有了球形大地的概念。这样的解读基本上是不成立的。古希腊的球形大地概念包含着一个非常重要的要素，即大地的尺度与天穹相比是可以忽略不计的。而在中国古代的天地观中，无论是盖天说还是浑天说，或者在其他哲学的或文学的语境中，天与地的尺度相当，始终处于对等的地位上。

宣夜说早已失传，其要点概括起来大致为：天是没有形质的，是一片虚空，日月众星浮于虚空之中，自由自在地运行着。

这种说法与现代宇宙学颇有形似之处，所以常常被作适当发挥之后，号称是中国古代最先进的宇宙学说。盖天、浑天之名皆有来历，“宣夜”一词作何解释，目前还不能知其究竟。

盖天、浑天、宣夜三家之外，还有其他几种宇宙学说，比如六朝时期吴姚信的昕天论、东晋虞喜的安天论和虞耸的穹天论。有人合称以上六家学说为“论天六家”，事实上后三家影响所及不出六朝时期。

大唐開元占經卷之一百四卷

算法

臣等謹按九執曆法梵天所造五通仙人承習傳

授肇自上古百博纂二月春分朔于時曜躔婁宿

道曆景正日中氣秋庶物咸康一切咸長動植攝

養神祇交泰握諸令節命為曆元寫稽閱設法數

建於章率述而不作正而古寫簡易之智昧得希

夷之妙冥東山鑠父而逾新裁往知來從而有謀

寧訣言之義以其同人多好遞筍非其彙難曰子

大德堂

筆終不傳此臣等謹述

天竺專精皆卽允在陰祕宬得詳通今削除繁冗開

明法要修仍舊貫鮮繼斯經攜列算術具錄如左

自口訣亦隨日附本章

算字法

樣　一字　二字　三字　四字　五字　六字

七字　八字　九字

右天竺算法用上件九箇字乘除其字皆一舉

札而成凡數至十進入前位每空位處恒安一點

图3.13　收录在《开元占经》中的《九执历》。

5.古代的中外天文学交流

在古代中外天文学的交流史上，有三次大规模的域外天文学输入：（1）汉末到宋初随佛教传入中国的印度天文学；（2）元明之际随伊斯兰教传入中国的阿拉伯天文学；（3）清之际随基督教传入中国的西方古典天文学。

无独有偶，这三次域外天文学来华都与宗教结伴，其中以发生在中古时期的第一次佛教天文学的输入为期最久。在从东汉末年到北宋初年将近800年的时间里，印度古代的天文学—其源头又可追溯到古巴比伦和古希腊的天文学，几乎不间断地随佛教经典的汉译传入中土。后两次天文学来华在内容和输入形式上与宗教不是非常密切，主要表现在出现了大量官方的和民间的天文学家对这两种异域天文学的研究，并伴有大量出版物。

佛教传入中土早期，就已经有天文学内容相当丰富的佛经被翻译成汉文。入唐以后，佛经翻译的数量有大量增加，特别是中唐时期随密教经典传入的天文学内容更为丰富。其中以《七曜攘灾诀》中保存的数理天文学内容最为引人注目，该经的主体构成就是五大行星和罗睺、计都两颗隐曜这七个天体的星历表，是迄今为止所见的最早星历表实物。

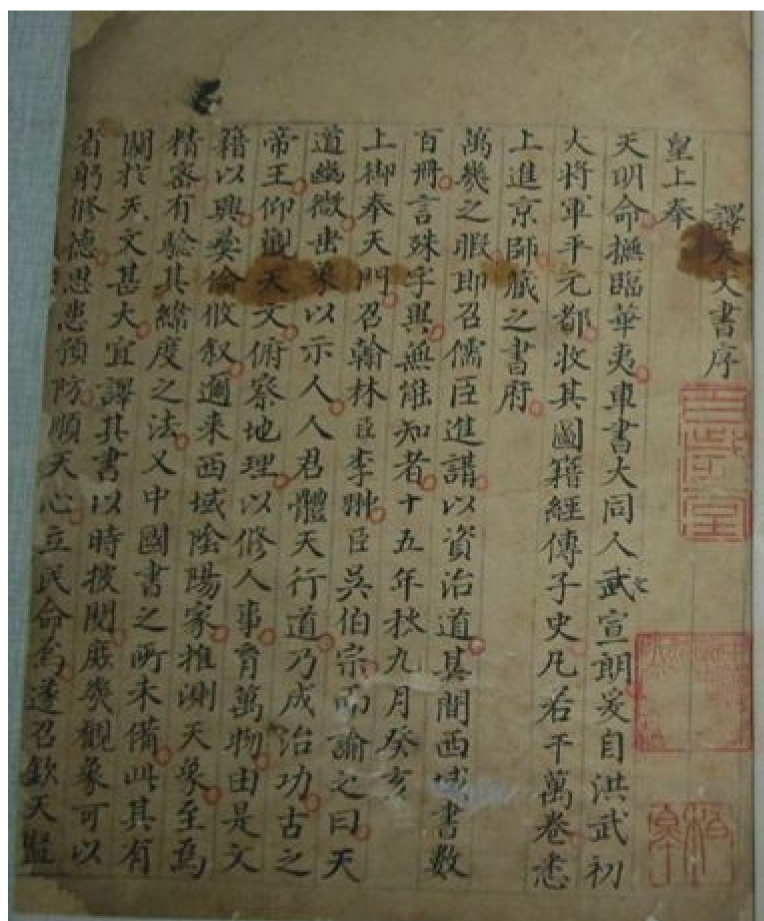
在唐代还有大量非佛经天文学资料传入，并且有不少印度天文学家活跃于唐朝官方天文机构，其中以所谓的“天竺三家”—迦叶氏、俱摩罗氏和瞿昙氏—最为著名。三家中又以瞿昙家族最为显赫，世代任官方天文机构的高官。其中瞿昙悉达于开元六年（718）奉召翻译的印度历法《九执历》，是研究中印古代天文学交流极其珍贵的史料，主要内容是有关日月运动和日月交食预报的计算方法。

与“天竺三家”在唐代官方天文机构中的活动形成对照的是唐建中年间术士曹士蔿的活动及其有印度渊源的《符天历》在民间的流行。五代马重绩《调元历》采用了《符天历》中的一些做法，是唐代印度天文学在民间大量流传的结果。

蒙古人建立起地跨欧亚的大帝国，使得东西方的文化交流变得畅通和活跃。作为中国天文学与西亚天文学交流、碰撞的代表人物，可举耶律楚材和丘处机两人。

耶律楚材出身于契丹贵族家庭，秉承家族传统，自幼学习汉籍，精通汉文，博览群书，旁通天文、地理、律历、术数及释老医卜之说。初仕金，后应召辅助成吉思汗。1219年随蒙古军远征西域。在撒

马尔罕（今乌兹别克斯坦撒马尔罕州首府）与当地天文学家就两次月食发生争论。耶律楚材造《西征庚午元历》，首次处理了因地理经度差造成的时间差，这应是受到了具有球形大地观的西方天文学影响的结果。事实上，耶律楚材本人也通晓伊斯兰历法，元代学者陶宗仪在《南村辍耕录》中对此有所记述。



譯天文書序
皇上奉
天明命撫臨華夷車書大同人武宣朗爰自洪武初
大將軍平元都收其圖籍經傳子史凡若干萬卷悉
上進京師藏之書府
萬幾之暇即召儒臣進講以資治道其間西域書數
百冊言殊字異無能知者十五年秋九月癸亥
上御奉天門召翰林臣李翀臣吳伯宗而諭之曰天
道幽微垂象以示人人君體天行道乃成治功古之
帝王仰觀天文俯察地理以修人事育萬物由是文
籍以興彝倫攸叙邇來西域陰陽家推測天象至為
精密有驗其緯度之法又中國書之所未備此其有
關於天文甚大宜譯其書以時披閱庶幾觀象可以
省躬修德思患預防順天心立民命焉遂召欽天監

图3.14　《明译天文书》序。

丘处机是中国道教史上非常著名的人物，他奉召西去为成吉思汗讲授养生长寿秘诀。丘处机于1221年到达撒马尔罕，与当地天文学家讨论了该年五月发生的日偏食。据丘处机的弟子李志常在《长春真人西游记》中的记载，丘处机留意到东西方向上不同地点对同一次日食所报告的食分大小和食既发生的时辰都不相同，观测地点越在东面，报告的时辰越晚。丘处机用扇子遮蔽灯光的比喻来解释不同地点所见食分大小之不同，但没有解释食既时辰的早晚。后者正是耶律楚材认

识到的地理经度差造成的地方时之差。

除了西去之中国人之外，西域天文学家也来到中国。元世祖忽必烈至元四年（1267），一位据推测是来自马拉盖天文台的波斯天文学家扎马鲁丁在元大都创制出7件西域天文观测仪器。《元史·天文志》记录这7件天文仪器的大致结构和功能。至元八年（1271），忽必烈下令在上都（今内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗境内）建立回回司天台，任命札马鲁丁为提点（即天文台台长），职责是用西域仪器观测天象，编制回回历。这座专门从事伊斯兰天文学研究的天文台在伊斯兰天文学史上具有相当重要的地位，是13—14世纪中国研究阿拉伯天文学的中心，对中国天文学的发展起了积极推动作用。

明朝兴起之初，也仿照元朝制度，建立回回和汉人两套天文机构。洪武十五年（1382）组织人力翻译了《回回历书》。

《回回历书》是一部伊斯兰数理天文学著作，后来（约1475年）贝琳据此整理成《七政推步》，成为中国古代系统介绍伊斯兰天文学的一部重要著作。洪武年间译成的伊斯兰天文书籍还有《明译天文书》，此书又称《天文宝书》、《乾方秘书》、《天文象宗西占》等名，是一本伊斯兰星占学著作。

明朝初年虽然进行了伊斯兰天文学书籍的翻译，但要历数整个明代的天文学成就，可用乏善可陈来总结。直到明朝末年，王朝摇摇欲坠之时，才兴起了一股大量译介西方天文学的高潮。整件事情与来华传教的基督教耶稣会士有关。

一般认为利玛窦（1552 - 1610）是耶稣会在华传教的开创者。他于万历十年（1582）到达澳门，经过多年的活动和努力，终于在万历二十九年获准觐见皇帝，并获允留居京师。当时《大统历》已显得疏漏不堪，推算日食屡屡失误。朝廷改历之议已持续多年。利玛窦了解到这一情况后，在给万历帝的奏表中自荐能够参与历法的修订。尽管利玛窦的初步尝试没有获得回应，但从此开启了耶稣会士打通这条“通天捷径”的努力，他们希望利用先进的天文历法知识打通进入明朝宫廷的道路，以利传教。

来华耶稣会士在欧洲都受到过良好教育，有些甚至专门在天文台受过名师指点。这些耶稣会士在与中国官员的交往中所展示出来的天文学造诣，给后者留下深刻印象。一些官员纷纷上书朝廷，推荐耶稣会士参与修历。



图3.15　由潘鼐编汇、上海古籍出版社2009年12月出版的《崇祯历书附西洋新法历书增刊十种》。

利玛窦之后，庞迪峨（1571—1618）、熊三拔（1575—1620）、邓玉函（1576—1630）、汤若望（1592—1666）等接踵而至，他们都精研天文历法。于是礼部便乘机上奏召邢云路、李之藻等入京，参与修历。邢云路可谓自学成才，李之藻则以西法为宗。

万历四十一年（1613），李之藻力荐庞迪峨、熊三拔及龙华民（1559—1654）、阳玛诺（1574—1659）等人。他在奏章中请求“敕礼部开局”，翻译西洋历法。

但当时“庶务因循，未暇开局”。直到崇祯二年（1629）五月乙酉

朔日食，时为礼部侍郎的徐光启根据西法预推，得顺天府见食二分有奇，琼州食既，大宁以北不食。

《大统历》、《回回历》所推结果与徐光启的结果相差很大。实测结果证明徐光启的结果正确。皇帝狠狠地责备了钦天监官员。面对这种尴尬局面，钦天监的上级主管部门礼部上奏朝廷建议开历局改历，并令徐光启督修历法。徐光启举荐南京太仆少卿李之藻、西洋人龙华民、邓玉涵参与修历，获得批准。九月癸卯历局正式开张。崇祯三年邓玉函去世，又征召西洋人汤若望、罗雅谷（1593—1638）译书演算。

徐光启升任礼部尚书，仍督修历法。

至此，耶稣会士的“通天捷径”终于走通了。同时，中国古代天文学的发展也走向了一个重大转折。在官方天文机构中一直以来都占据着主导地位的中国传统天文学将被一种来自西方的天文学彻底取代。

徐光启于崇祯六年去世，李天经继续主持修历工作，完成了余下的工作。到崇祯七年（1634），这个由中外天文学家组成的修历班子，完成了一部137卷的《崇祯历书》。

徐光启深受西方知识体系的影响，注重将知识建立在对基本原理的牢固掌握之上。《崇祯历书》共分为法原、法数、法算、法器和会通等基本五目，其中法原一目是天文学的基础理论部分，占到全书三分之一篇幅。其中系统介绍了欧洲古典天文学的理论和方法，着重阐释了托勒密、第谷、哥白尼等三人的天文学工作，对开普勒和伽利略的天文工作也有介绍。全书的重要天文参数和大量天文数表都源自第谷的天文学体系。第谷体系的精度明显高于托勒密体系和哥白尼体系，所以在当时具有其先进性和优越性。

在《崇祯历书》的编撰过程中，徐光启、李天经等人面临着守旧派人士如冷守中、魏文魁等人的不断质疑和批评。冷、魏极力诋毁西法，主张使用中国传统历法。徐、李则努力捍卫西法的优越性。这种争论在《崇祯历书》完成之后又持续了10年，等到崇祯终于“深知西法之密”，决定采用西法改进大统历法颁行天下时，闯王进京，清兵入关，明朝灭亡了。1644年清军进入北京，汤若望将《崇祯历书》略作增删献给清廷。顺治御笔题名为《西洋新法历书》，以此为基础编成《时宪历》颁行天下。



图3.16　汤若望,从他开始开启了清廷任用耶稣会传教士负责钦天监的传统。

第四章 阿拉伯世界的天文学

公元632年穆罕默德死后不久，他所创立的宗教以惊人的速度在中东扩散，并越过北非，进入西班牙。公元762年，他的继任者建立新都巴格达。此时，在希腊文化曾经兴盛的区域，希腊文明早已沦落为一种异教传统。许多包括《至大论》在内的希腊文著作的手稿在君士坦丁堡和东罗马帝国版图内的图书馆中被束之高阁、尘封日久。巴格达宫廷的穆斯林统治者通过与被东罗马帝国驱逐的异教学者接触，了解到存在着古老的智慧宝藏，它们用异族语言撰写，大部分以手稿的形式保存在遥远的图书馆里。

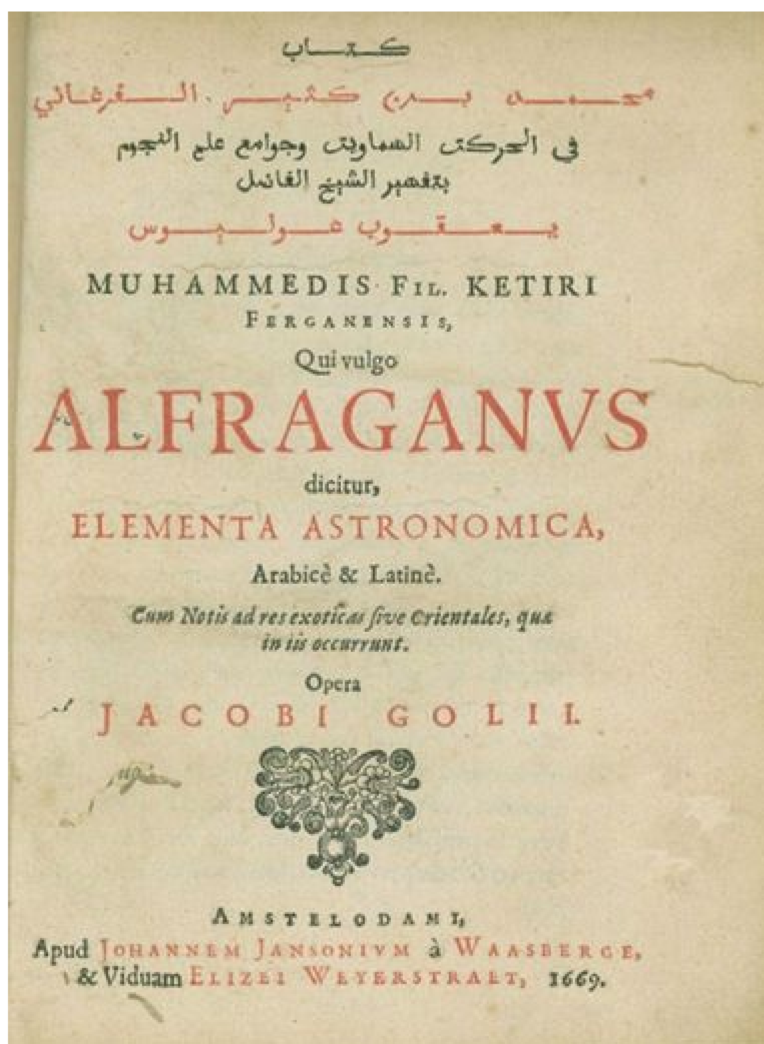


图4.1　公元750年左右穆斯林的势力范围。

穆斯林统治者们认识到翻译这些古老知识是学习的捷径。公元786年起任哈里发的拉希德（786—809年在位）派人到拜占庭收购希腊手稿，启动大翻译运动。

到9世纪初，哈里发马蒙（813—833年在位）在巴格达建立起一个翻译中心，即著名的“智慧宫”。说叙利亚和阿拉伯语的学者，在基督徒胡那因·伊本·伊沙克·伊巴迪（808—873）的领导之下，通力合作，将希腊文或古叙利亚文的希腊著作译成阿拉伯文。

这个时期的伊斯兰教所体现出的一种对其他宗教的宽容，进一步推动了阿拉伯学术的兴起。随着穆斯林势力的扩张，伊斯兰教统治到哪里，阿拉伯文就被那里的人们熟悉，译成阿拉伯文的希腊著作得以广泛传播，以至于写成《古兰经》的语言成为了国际性的科学语言。


كتاب

محمد بن كثير الفرغاني

في الحركات السماوية وجوامع علم النجوم

بتفسير الشيخ الفاضل

يعقوب غوليوس

MUHAMMEDIS FIL. KETIRI
FERGANENSIS,
Qui vulgo
ALFRAGANVS
dicitur,
ELEMENTA ASTRONOMICA,
Arabicè & Latinè.
Cum Notis ad res exoticas sive Orientales, quæ in iis occurrunt.
Opera
JACOBI GOLII.

AMSTELODAMI,
Apud JOHANNEM JANSONIVM à WAASBERGE,
& Viduam ELIZEI WEYERSTRAET, 1669.

图4.2　法干尼的《天文学基础》。该书对托勒密学说作了简明扼要、通俗易懂的概述，全书没有用到繁难的数学知识。此书有几个拉丁文版本流传，于12到17世纪之间在欧洲被广泛阅读。

公元12世纪基督教收复伊比利亚半岛，这些著作又回到基督徒手中，被译为拉丁文。希腊著作以这种迂回的方式进入了拉丁世界，保持了天文学传统的连续性。

1.阿拉伯天文学概况

阿拉伯人对周边先进文化的大翻译运动和伊斯兰宗教仪式所提出的天文学问题，激励了阿拉伯天文学的起步和发展。阿拉伯天文学也称伊斯兰天文学或穆斯林天文学，它伴随着公元7世纪伊斯兰教的兴起，一直繁盛到15世纪左右，在广阔的伊斯兰文化地区大体形成了三个学派，即巴格达学派、开罗学派和西阿拉伯学派。

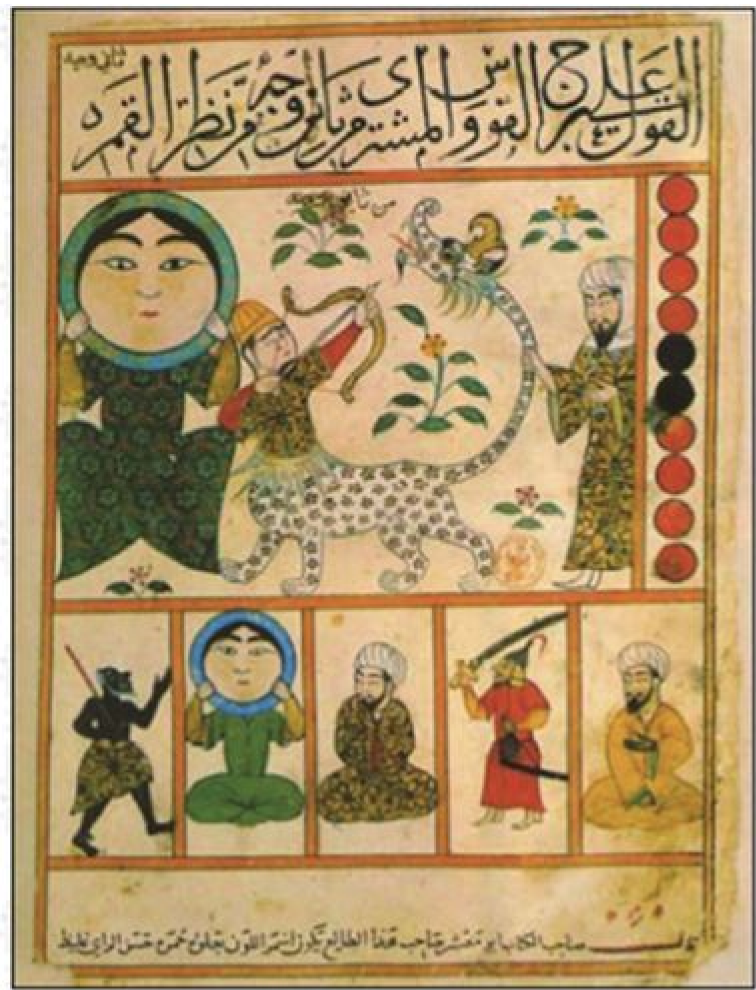


图4.3　马舍尔天文学论著书影（公元850年）。

阿拔斯王朝（750—1258，中国史称黑衣大食）于公元762年在巴格达建都以后，继承了古巴比伦和波斯的天文学遗产，又积极延揽人才，翻译希腊和印度的天文学著作。公元829年在巴格达建立了天文台，在这里工作过的著名天文学家有法干尼等人。法干尼最重要的著作是写于公元833到857年之间的《天文学基础》，此外他还有两种有关星盘的论著流传于世。

贾法尔·阿布·马舍尔（787—886）是一位波斯数学家、天文学家、星占学家，他的著作被翻译成拉丁文，在中世纪欧洲的星占学家、天文学家和数学家中间广为流传。他的《星占学巨引》一书是1486年德国奥格斯堡第一批印刷的书籍之一。马舍尔提出过一种行星运动模型，一些学者还认为这是一个日心模型，但这本论述行星运动的著作没有流传下来。



图4.4　苏菲所绘制的人马座。

塔比·伊本·库拉（836—901）出生在美索不达米亚的哈兰（今土耳其东南部），曾在巴格达的智慧宫学习。他研习多种学问，包括数学、天文、星占、力学、医学和哲学。他的母语是叙利亚语，也精通希腊语。他把阿波罗尼乌斯、阿基米德、欧几里德和托勒密的著作翻译成叙利亚语。

塔比发现岁差常数比托勒密提出的每百年春分点退行1°要大，而黄赤交角则从托勒密时的23°51′减小到了23°35′。

他把这两个现象结合起来，提出了颤动理论，认为黄道和赤道的交点除了沿黄道西移以外，还以四度为半径，以四千年为周期，作一小圆运动。为了解释这个运动，他又在托勒密的八重天（日、月、五星和恒星）之上加上了第九重。按照哥白尼的说法，塔比确定一恒星年的长度为365天6小时9分12秒（比精确值只长了2秒）。

阿尔巴塔尼（约858—929）与他的前辈塔比一样也出生在哈兰，他是一位天文仪器制造者的儿子，被称为穆斯林中最伟大的天文学家，伊斯兰天文学中的重要贡献大多是属于他的。他广为人知的一项天文学成就是确定了一回归年的长度为365天5小时46分24秒，他父亲给他制造了更好的仪器，超过了希腊人所用的，因而获得了更为精确的回归年长度。

阿尔巴塔尼仔细检查了托勒密的计算，做了少量改进。他发现太阳的远地点已不再位于托勒密所说的原来位置。由此，他推断远地点是在缓慢移动的，并相当准确地求出该移动值为每年54.5″。他还将二分点的时间确定在误差小于一、两小时之内，从而得出地轴与其公转平面的精确倾角值为23°35′。

阿尔巴塔尼最重要的著作是一部57卷的《历算书》，该书由意大利数学家柏拉图·迪布蒂努斯在1116年翻译成拉丁文，取名为《论星的科学》，哥白尼、第谷、开普勒等欧洲伟大的天文学家都受到过该书的影响。哥白尼在《天体运行论》中多次引用阿尔巴塔尼的工作。

阿尔巴塔尼还第一个在天文计算中引入了正弦函数，完善了球面三角学计算方法，这是阿拉伯人在天文学上最大的贡献之一。

比阿尔巴塔尼稍晚的波斯天文学家苏菲（903—986）所著《恒星之书》（964）一书，被认为是伊斯兰实测天文学的三大杰作之一。苏菲根据自己的观测，在书中绘制了精美的星图，给出恒星的位置、星等和颜色。现在世界通用的许多星名，如Altair（西名天鹰座α，中名牛郎星）、Aldebaran（西名金牛座α，中名毕宿五）、Deneb（西名天鹅座α，中名天津四）等，都是苏菲定下的。

苏菲还确认了大麦哲伦云，在也门能够观测到这一天体。欧洲人要直到16世纪麦哲伦环球航行时才观测到这一天体。他还在964年最早报告了对仙女座星系的观测，他把它描述为一朵“小云”。

巴格达学派的最后一位著名人物是波斯天文学家、数学家阿布·瓦法（940—998）。阿布·瓦法是10世纪阿拉伯天文学巴格达学派的代表人物之一，曾在巴格达天文台任职，并在当地建造了第一座观测天体的象限仪，对黄赤交角和分至点进行过测定，为托勒密的《天文学大成》写过简编本。他在天文计算中运用了正切和余切这两种三角函数，计算了步长为15′的正切函数表。并提出了正割和余割函数，证

明了球面三角学中正弦定理的普遍性，设计了计算正弦函数表的新方法，给出了步长为15′的正弦函数表。他还翻译并注释了希腊数学家欧几里德和丢番图的著作。阿布·瓦法以后，至阿拔斯王朝灭亡的160多年中，巴格达学派再无重大发展。

公元10世纪初，在突尼斯一带兴起了法提玛王朝（909—1171，中国史称绿衣大食）。这个王朝于公元973年迁都开罗以后，成为西亚、北非一大强国，在开罗形成了一个天文中心。这个中心最有名的天文学家是伊本·尤努斯（约950—1009），他先后服务于法提玛王朝的两任哈里发阿齐兹和哈基姆，伊本·尤努斯把他的名著《哈基姆历数书》献给了后者。该书是一部包含了许多天文数表的便捷手册，收录了非常精密的观测数据，这些数据都用巨型的天文仪器测得。他还汇编了自829年至1004年间阿拉伯天文学家和他本人的许多观测记录。他记录了40次行星合和30次月食。977年和978年他在开罗所作的日食观测和979年所作的月食观测，为近代天文学研究月球的长期加速度提供了宝贵资料。



图4.5　阿尔哈增肖像。阿尔哈增的多部著作被译为西班牙语、希伯来语和拉丁语，对欧洲科学产生过重大影响。在中世纪欧洲，他拥有一个“托勒密二世”的绰号。据说阿尔哈增为了给自己谋个一官半职，宣称他能为治理尼罗河洪水设计一种机器。这引起了哈里发的重视，他被任命专管此事。但不幸的是这位哈里发是反复无常、暴虐成性的哈基姆，一位戴着王冠的疯子。哈基姆要求他立刻制造出这种机器，否则他不得好死。阿尔哈增知道这决不是开玩笑，只得装疯，一直装到1021年哈基姆死去为止。

与伊本·尤努斯同时在开罗活动的还有博学的伊斯兰学者阿尔哈增（965—1039）。阿尔哈增的研究兴趣遍及光学、天文学、数学、哲学、物理学、工程学、机械学、医学、解剖学、眼科学、心理学等。

他最感兴趣的领域是光学，因其所取得的成就而被称为“现代光学之父”。在希腊化时期希罗和托勒密都研究过光学，他们认为人能

看见物体是靠眼睛发射出的光线被物体反射的结果。阿尔哈增则认为光是由太阳或其他发光体发射出来的，然后通过被看见的物体反射入人眼，显然他的观点是正确的。他还正确地解释了透镜的原理，探讨了虹，研究了光通过透镜的聚焦，并制作了无透镜的针孔成象机，研究了大气折射问题。他的著作《光学》在12世纪末或13世纪初被翻译成拉丁文，在欧洲中世纪赢得巨大声誉。

阿尔哈增在《论月光》中对月球接受太阳光照射而发亮的问题进行了详细研究。在《光学》第15、16卷中，阿尔哈增首先提出了天球层并非由固态物质组成的观点，他指出天层比空气要轻。这些观点对哥白尼和第谷的学说产生了影响。

阿尔哈增还解释了月亮大小错觉问题。月亮在靠近地平线时看起来比高悬在天空中要大。托勒密曾经把这解释成是由于大气折射造成的。阿尔哈增指出这是由于视觉的错觉造成的。通过罗切尔·培根等人的介绍，这一心理现象慢慢被欧洲人接受，托勒密的解释则被抛弃。阿尔哈增还批评了托勒密的许多部著作，包括《至大论》、《行星假说》和《光学》等。他指出了托勒密书中的许多自相矛盾之处，还进一步对托勒密天文体系的物理真实性提出了严厉的评判。

阿尔哈增重视数学的严密性和实验证明。他区分了星占学和天文学，并拒绝研究星占学。因为他认为星占学家使用的是推测的方法而不是立足于经验基础。同时星占学与伊斯兰教条也相冲突。

阿拉伯的倭马亚王朝于公元750年被阿拔斯王朝推翻之后，倭马亚家族成员被杀戮殆尽，唯一漏网的阿卜杜勒·拉赫曼逃至西班牙，并在那里建立了自己的政权。倭马亚王朝在西班牙得以延续，中国史称白衣大食。西班牙倭马亚王朝最早的天文学家是科尔多瓦的查尔卡利（1029—1087）。他居住在托莱多，是那个时代杰出的阿拉伯数学家和第一流的天文学家，他将理论知识和实用技巧结合起来，创制了精密的仪器用于天文观测。查尔卡利修正了托勒密的地理数据，特别是地中海的长度。他第一个毫无争议地证明了太阳远地点的进动，他测出的进动值为每年12.04″，非常接近现代值每年11.8″。

查尔卡利的最大贡献是他于1080年编制的《托莱多天文表》。这个天文表的特点是其中有仪器的结构和用法的说明，尤其是关于阿拉伯人特有的仪器—星盘—的说明。在《托莱多天文表》中，还有一项重要内容，就是对托勒密体系作了修正。查尔卡利以一个椭圆形的均轮代替水星的本轮，从此掀起了反托勒密的思潮。这种思潮发端于阿芬巴塞（？—1138），阿布巴克尔（1105—1185）和比特鲁吉（？—1204）为其继承者。他们反对托勒密的本轮假说，理由是行星必须环绕一个真正物质的中心体，而不是环绕一个几何点运行。因此，他们就以亚里士多德所采用的欧多克斯的同心球体系作为基础，提出一

个漩涡运动理论，认为行星的轨道呈螺旋形。

其后信奉基督教的西班牙国王阿尔方索十世于1252年召集许多阿拉伯和犹太天文学家，把《托莱多天文表》翻译成西班牙语，以此为基础改编成《阿尔方索天文表》。

2.伊斯兰教的天文学课题

伊斯兰教既在一般意义上鼓励天文学研究，伊斯兰宗教实践活动也对数理天文学提出了非常具体的要求。《古兰经》中说：“真主为你布置了群星，让你在黑暗的大地上和海洋中得到指引。”在这样的教义鼓舞下，穆斯林们创制出了优良的实测和导航仪器，现如今极大多数亮星的名字都源自阿拉伯语。《古兰经》中还写道：“他们向你询问月相的盈虚变化，答：这些月相的变化为人们的日常活动和朝圣提供了固定的时间。”这就为穆斯林天文学家提出了需要解决的问题，包括历法中月首新月的测定和祷告时刻的确定，还有遍布在广阔的伊斯兰文化区域内各地清真寺的朝向问题也是亟待解决的难题。

《古兰经》中说：“按照安拉的意见，一年中月份的数目是十二。”所以，伊斯兰教的历法只能是每年有12个朔望月的纯阴历，不允许安插闰月。12个朔望月比一个回归年少11天多，所以使用纯阴历的后果之一就是使得穆斯林的神圣月份斋月可以出现在一年中的任何季节。

伊斯兰历法还规定一个月的第一天不是朔所在的这一天，而是新月初见于西方天空的那一天—类似于中国古代西周时期作过月首的“朏”。由于月球绕地运动的复杂性，这样的新月初见于西方天空的日子有时在朔后的第二天，有时在第三天，并没有简单的规律可循。所以月首的确定一方面需要靠实测，另一方面必须辅助以一些理论上的预测。

早期的穆斯林天文学家利用了一条来自印度天文学的判据：即如果太阳和月亮在当地地平线落下的时刻差在48分钟以上时，新月就可以被观测到。后来翻译成阿拉伯语的托勒密《至大论》中关于月亮运动的理论提供了足够的精度来计算新月的出现，但《至大论》是用黄道坐标来描述月亮位置的。为了描述新月的可见与否，需要将黄道坐标化为地平坐标。这里穆斯林天文学家们面临的是一个相当复杂的球面几何问题。后来的穆斯林天文学家们编制出一些精巧的数表来帮助计算每月之始新月的可见情况，但甚至时至今日，这个问题在穆斯林世界仍是一个具有挑战性的难题。

根据伊斯兰教义，每一位穆斯林，不分男女，每天都必须按时作五次祷告。它们分别是：

（1）晨礼：在早晨东方黎明初现晨光直至太阳将出之间进行。

（2）晌礼：在中午过后太阳偏西，直到影子长度是原物两倍的

这段时间内进行。

（3）晡礼：从晌礼末时直到太阳将落之前进行。

（4）昏礼：从日落开始至晚霞消失前举行。

（5）宵礼：从晚霞散尽开始直到黎明之前举行。

如何准确确定这五个祷告时间段的起讫时刻点，是穆斯林天文学家面临的一个难题。早期那些发布祷告时刻的授时者依据的可能是阿拉伯民族原有的简单办法。到了公元9世纪前半叶，一位巴格达智慧宫的成员、数学家、天文学家花拉子模（约780—850）吸收了来自印度天文学的方法，编制了一份对应于巴格达纬度的祈祷时刻表。随后第一部根据巴格达地区太阳地平高度确定白昼时刻和根据亮星地平高度确定夜间时刻的天文表也被编制出来。

由于祷告时刻的确定是这样一门复杂的学问，所以到后来专门为每一座清真寺配备了一位专职的授时官，叫做穆瓦奇特。这样的职位至少为那些有能力的天文学家提供了一个制度上的避风港，因为伊斯兰教义排斥星占学，所以天文学家很难通过星占学挣钱，但他们成为授时官，在社会上就可以获得安全并且受人尊敬的地位。这样一个制度所产生的积极后果就是，相关的天文学著作不仅在数量上飞速增长，而且在质量上也有很大提高。

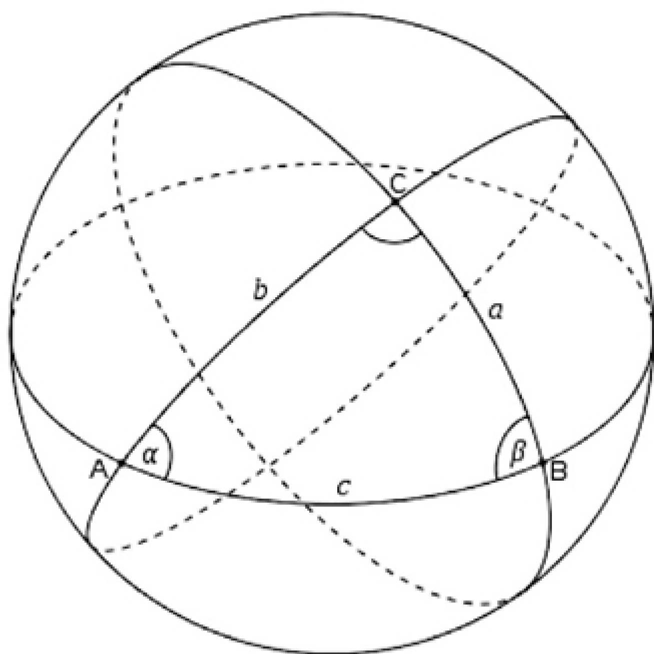


图4.6　球面三角形的边和角。

伊斯兰教的许多宗教法令都规定遍布从西班牙到中亚各个地方清真寺的朝向必须向着麦加大清真寺广场中央的圣殿神圣黑石“克尔白”。各地穆斯林做祷告时也要面向麦加，这个朝向有一个专门的名称叫做“奇布拉”。显然，“奇布拉”也是朝圣者向麦加出发的方向。

确定不同地点的“奇布拉”是一个专门的球面三角形问题。在好几个世纪里，伊斯兰天文学家一直在研究如何运用已知的地理学数据从数学上确定“奇布拉”。他们获得了基本的球面三角学公式，并从中计算出各种简便数表。

大约到公元11世纪左右，穆斯林天文学家们在这个问题上取得了显著的成就。

他们研制出了一幅以麦加为中心的网格地图，从这样的地图中，可以直接读出到麦加的方向和距离。到约公元1375年，大马士革的天文学家哈里里制作了一张数表，给出了从北纬10°到56°之间、从麦加东西各60°之间每一度的“奇布拉”。这项工作要用到一系列复杂而精确的球面三角公式，并经过浩繁的计算来完成。

无论是预测新月的出现，还是确定祷告的时刻和清真寺的朝向，对这些问题的解决，在数学上都依赖于球面三角学的发展。而球面三角学这个数学分支的发展，正是伊斯兰天文学家们做出的贡献。

当初托勒密在解决一些天文问题时，虽然也需要根据天球上球面三角形已知的边或角来求解未知的边和角，但他运用较为笨拙的弦函数。到公元9世纪，三角学中的六个函数已经被发现。正弦函数从印度被介绍给了伊斯兰，一同被介绍进来的还有在计算影长时非常重要的正切和余切函数。

大约在830年，巴格达的波斯天文学家、数学家哈西卜编造了步长为15′的正弦表，并且还编制了间隔为1°的正切表。

如前文所提及的，后来阿布·瓦法进一步编制出了步长间隔为15′的正弦表和正、余切表，特别是比鲁尼还利用二次内插法编制了正弦、正切函数表。

是阿尔巴塔尼把三角学加以了系统化。他提出了正弦、余弦、正切、余切等三角学术语；正割、余割这两个术语则是阿布·瓦法最早引入的。阿尔巴塔尼发现了其中几个基本的三角函数关系式，他还发现了球面三角形的余弦定理。

阿布·瓦法和比鲁尼等人进一步丰富了三角学公式。阿布·瓦法证明了平面和球面三角形的正弦定理。比鲁尼则证明了正弦公式、和差化积公式、倍角公式和半角公式。这些伊斯兰天文学家发现的三角学基本恒等式，大大简化了天球上球面三角形所涉及的计算。

到了马拉盖天文台的纳西尔丁·图西那里，平面和球面的三角学已经成熟到开始脱离天文学成为一门独立的数学分支。

他所著的《论完全四边形》是一本纯粹的三角学专著。该书系统阐述了平面三角学，明确给出了正弦定理，讨论了球面完全四边形，对球面三角形进行了分类，特别是首次给出了球面直角三角形的6种边角关系。这些定理和公式，正是现在球面天文学的基本内容。

3.伊斯兰天文台

对《至大论》的翻译提升了阿拉伯行星天文学的水平。然而托勒密行星模型的有效性，不仅依赖于它们自身的几何构造，也依赖于其中所用参数的精确程度。

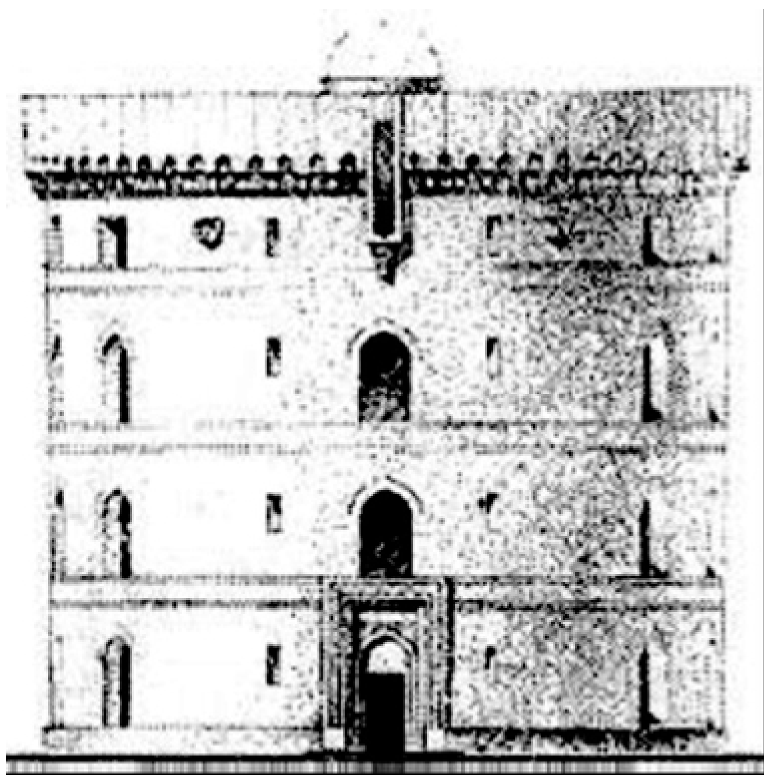


图4.7　如今在马拉盖天文台的遗址残存了不少地基。

在340米长、150米宽的天文台建筑场地中矗立着一幢高4层、直径28米的圆柱形建筑。

好几个世纪过去了，《至大论》里的参数显然有必要重新测定，这就需要足够精度的测量仪器。

伊斯兰天文学家最初使用的仪器是小型和便携式的，但他们相信更大型的仪器能带来更高的测量精度。在这种信念支配下，阿拉伯天文学仪器走上了大型化的道路。许多穆斯林君主和有财有势的赞助人

都出资建造这类仪器。因为这些大型仪器不方便携带，需要有个固定的地方安置它们，这就导致了许多伊斯兰天文台的兴建。但是部分宗教权威对星占学的敌视，或者某个赞助人的死亡，都会给某个天文台带来末日。所以，许多伊斯兰天文台存在的日子并不长久，影响有限。其中有两个天文台存在时间稍久，产生的影响也较为深远。它们是马拉盖天文台和乌鲁伯格天文台。

马拉盖（今伊朗北部）天文台由波斯的蒙古统治者、成吉思汗之孙旭烈兀（1217—1265）为波斯天文学家纳西尔丁·图西建造。旭烈兀相信他的一系列军事胜利受惠于天文学家（也是星占学家）们—特别是图西—的建议。因此，当图西抱怨他的天文数表老旧而过时了的时候，旭烈兀就特许他选择一个地方建造一座新天文台。

马拉盖天文台是那个时期最大的天文台，于1259年动工，建于一个山顶之上，由一系列建筑群组成。天文台的仪器安放在露天，其中包括一座半径不小于14英尺的墙象限仪，一座半径约5英尺的浑仪，和许多较小一些的仪器。墙象限仪沿着子午面安装。借助天文台的仪器，图西和其他杰出天文学家们经过12年的紧张工作，于公元1271年完成了一部包含了他们的观测结果和行星模型的《伊尔汗历数书》。这部历数书在旭烈兀的儿子阿巴哈汗（1234—1282）统治下出版，一直流行到15世纪。《伊尔汗历数书》中的天文表以通过该天文台的子午线为本初子午线，使得马拉盖天文台的地位有点像后来的格林尼治天文台。

马拉盖天文台还拥有一个包括各种科目、藏书达40000册的图书馆。被称为13世纪最博学的叙利亚东正教学者巴-赫布雷乌斯（1226—1286）晚年定居到了天文台附近，目的就是为了能方便地使用天文台中的图书，他留下了一些描述天文台的文字。

在天文台与图西一起工作的天文学家来自波斯、叙利亚、安纳托利亚、拜占庭甚至中国。现在知道至少有20位以上知名知姓的天文学家曾在这个天文台工作。另外还有大约超过100位学生在图西的指导下学习天文学。

马拉盖天文台天文学家们的研究还形成了一个对后世产生重大影响的学术传统，史称“马拉盖学派”。该学派的天文学研究传统始于马拉盖天文台，并由大马士革和撒马尔罕的天文学家们延续。马拉盖学派的天文学家们与他们的西阿拉伯学派的安达卢西亚先驱们一样，试图解决托勒密体系中的对点问题，并提出可取而代之的行星运动模型。在提出消除了对点和偏心运动的非托勒密模型方面，他们比他们的安达卢西亚先驱们更为成功。在预测行星位置方面，他们的模型也比托勒密模型具有更高的数值精度。

一些学者把马拉盖学派在反对托勒密天文学的过程中取得的成就

叫做“马拉盖革命”、“马拉盖学派革命”或“文艺复兴之前的科学革命”。这场革命的一个重要之处在于，马拉盖学派的天文学家们意识到天文学应该致力于用数学语言描述作为物理实体的天体的运动，而不应该只停留在数学假设层面上拯救现象。马拉盖天文学家们也认识到亚里斯多德所认为的宇宙中只有圆周运动或直线运动的观点是不正确的，譬如图西的“双本轮”设计就表明了直线运动可用圆周运动产生出来。

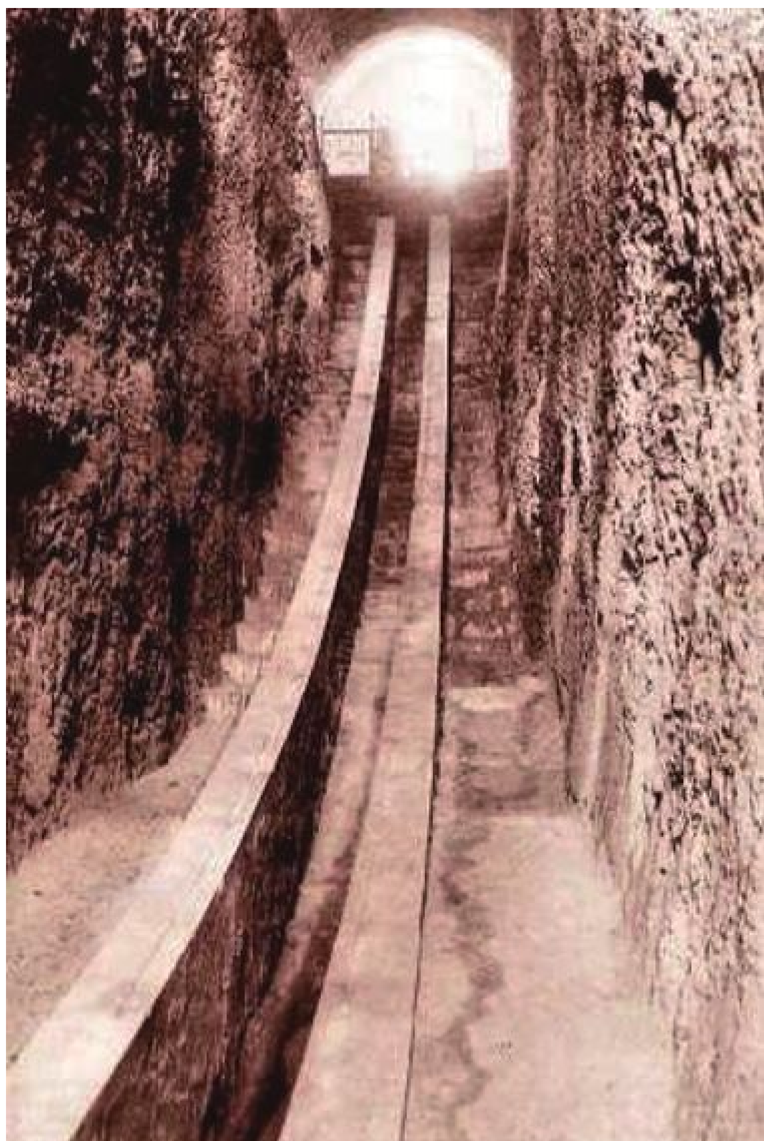


图4.8　乌鲁伯格的巨型六分仪残基。

图西死后，他的儿子被任命为天文台的台长。天文台后来遭受了一系列地震的损坏，并由于运转资金短缺，到14世纪中期被废弃。伊朗国王阿巴斯（1571—1629）曾计划修复该天文台，然而直到他早逝之前都没有机会实施。乌鲁伯格有一次访问了这个天文台的废墟之后，决定在撒马尔罕建造一个大天文台来延续马拉盖学派的传统。

撒马尔罕（今乌兹别克境内）行省统治者、帖木儿的孙子乌鲁伯格（1394—1449）于公元1420年建立的天文台，是最为著名的一座伊斯兰天文台。这个天文台最热心的、很可能也是最博学的天文学家，就是乌鲁伯格本人。

乌鲁伯格年纪轻轻就成了撒马尔罕行省的统治者，在他的治理下，撒马尔罕变成了帖木儿帝国的智慧中心。在1417到1420年之间，乌鲁伯格在撒马尔罕的雷吉斯坦广场建了一座马德拉萨（相当于大学或研究所），他邀请了大量伊斯兰天文学家和数学家到此进行研究。这座马德拉萨的建筑至今犹存。

乌鲁伯格自己的兴趣在于天文学。他所建造的天文台叫做“古尔罕尼”。当时没有望远镜来帮助观测，乌鲁伯格想到用增加他的六分仪的尺寸来提高测量精度。

这架被叫做“法克里”的六分仪由两堵间隔约20英寸的南北方向的大理石墙构成，半径达40米，光学分辨率为180″。

先前的一些阿拉伯星表大多只是在托勒密的星表基础上加上岁差改正而成，乌鲁伯格发现了其中的一些严重错误，于是下定决心重新测定主要亮星的位置。乌鲁伯格使用他的六分仪，在1437年编制了包括近1000颗恒星位置的《乌鲁伯格星表》。该星表被认为是介于托勒密和第谷之间最重要的恒星星表之一，是独立于苏菲的《恒星之书》之外的另一项重要工作。这份中世纪最重要的原创星表，分别在1665年由英国著名东方学家托马斯·海德、1767年由格里高利·夏普、1843年由贝利珠的发现者佛朗西斯·贝利介绍到欧洲。

1437年乌鲁伯格还测得恒星年的长度为365.2570370天（365天6小时10分8秒，比准确值长58秒）。为了获得这个结果，他使用了50米的高表，进行了多年测量。88年后的1525年哥白尼把恒星年的精度又提高了28秒。乌鲁伯格还编造了精确的正弦表和正切表，它们的数值精度准确到小数点后面第8位。

乌鲁伯格在科学上的才能与他的统治技巧并不相称。在与敌对王国的作战中，他输掉了几场战争。1448年他在赫拉特取得一次胜利之后进行了大屠杀。1449年他在去麦加朝圣的路上被他的亲生儿子阿波德·拉蒂夫谋杀，此时天文台正要度过它的30岁生日。随着主人的去

世，天文台的观测工作也就寿终正寝。

4.阿拉伯的行星天文学

希腊几何天文学为了达到“拯救现象”的目的，花了将近500年时间。到托勒密写成《至大论》的年代，雅典文化的黄金时代已经成为遥远的追忆。一些巴比伦和希腊天文学的元素已经沿着亚历山大大帝的大军开辟的通道渗透到印度文化中，但直到600年后才又反输到两河流域刺激阿拉伯行星天文学的兴起。

公元770年左右一个印度使团来到巴格达，带来一部梵语《悉檀多》，启动了阿拉伯的行星天文学研究。巴格达智慧宫的花拉子模，留下了一部共37卷的早期《积尺》。阿拉伯《积尺》使用的大部分参数和计算程序，都来自印度天文学。巴斯的阿德拉德在公元12世纪把一部《积尺》译成拉丁文，这是印度方法传到中世纪西方的途径之一。

对托勒密《至大论》的翻译无疑是阿拉伯天文学提升其行星天文学研究水平的另一条重要途径。许多阿拉伯天文学家都对托勒密表达了足够的尊敬，但是对《至大论》中已显粗疏的天文参数进行了修订，阿尔巴塔尼就是其中之一。

他首次对托勒密的计算做出了改进。他发现太阳的远地点已不再位于托勒密所说的原来位置，并推断出远地点进动值为每年54.5"。他还改进了回归年长度，纠正了托勒密的岁差常数，仔细测量了黄赤交角，将正弦函数引进三角学。他的57卷《积尺》经过穆斯林的西班牙，传到了基督教世界。印刷术的发明使此书传播得更广，哥白尼对此颇多引用，在《天体运行论》中哥白尼提到此书作者的名字不下23次。

通过比较《至大论》中的抽象几何模型和托勒密在《行星假说》中描述的关于宇宙的物理学观点，托勒密天文学的不完备性就可显现出来。早在公元9世纪，巴格达的塔比·伊本·库拉就已经注意到这方面的矛盾。到公元10世纪的阿拉伯天文学文献中，不断出现对托勒密的“怀疑”。

托勒密天文学中最明显的招人怀疑的对象就是关于“对点”的设计，这一设计使得行星运动时快时慢，直接违背希腊天文学最基本的原则—天体运动必须是匀速圆周运动。托勒密行星运动模型中的偏心圆运动也使得行星的圆周运动不再以地球为中心，也是令人反感的。在一些阿拉伯天文学家和哲学家看来，甚至本轮也是与亚里士多德主义相冲突的。

关于偏心和本轮的争论起初主要发生在西阿拉伯学派的天文学家和哲学家们中间。但任何试图抛弃偏心圆和本轮来预测行星运动的尝试都是不成功的。伊斯兰最伟大的亚里士多德学说解释者、安达卢西亚人拉什德，试图用同心球层计算行星位置，但误差巨大。然而在13世纪早期他的著作被译成拉丁文之后，他在自然哲学家中间居然获得了某些赞同。

开罗的阿尔哈增是拒绝托勒密“对点”的天文学家之一。他在《质疑托勒密》一书中批评了托勒密的许多部著作，包括《至大论》、《行星假说》和《光学》等。他指出了托勒密书中的许多自相矛盾之处，认为托勒密的一些数学上的处理，尤其是对点的引入，违背了天体在物理上匀速圆周运动的要求。他还进一步对托勒密天文体系的物理真实性提出了严厉的评判。阿尔哈增在《论世界之结构》一书中虽然还是持有地心学说，但他试图改造《至大论》中的行星模型使之具有物理上的实在性。他认为天空由同心球壳层组成，各层占据一定厚度，其间还有一些别的壳和球。用这种方法，他试图为托勒密模型中的每一个简单运动设计一个球体。

在《七大天体运动模型》一书中，阿尔哈增提出了一个非托勒密的行星运动模型。这是第一个拒绝对点和偏心圆运动的几何模型。阿尔哈增把物理实体还原为几何实体，提出了地球绕轴自转的可能性，认为所有运动指向地心这一点没有任何物理意义。在书中他还更早地实践了“奥卡姆剃刀”原则，他只用最少的假说来考虑天体运动。

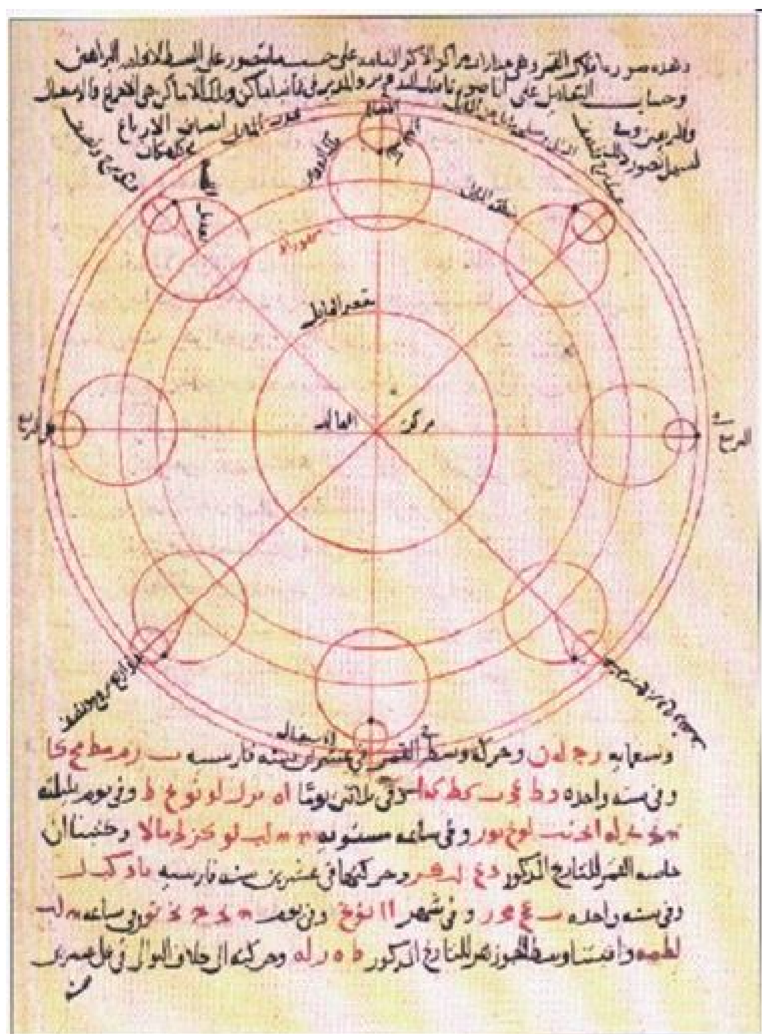


图4.9　沙提尔的月亮运动模型。

最后成功地消除了托勒密体系中的偏心圆和对点，并提出替代行星运动模型的是马拉盖学派的天文学家们。

穆阿伊丁·乌尔迪是第一位提出非托勒密模型的马拉盖天文学家。马拉盖天文台的纳西尔丁·图西在他的著作《备忘录》中，成功地设计出了一个令人满意的替代品，他只使用匀速圆周运动就完成了行星运动模型的构建，代价是每个行星运动模型增加到两个本轮。图西发明的这种“双本轮”设计，能使用两个圆周运动来产生直线运动。图西的“双本轮”设计，取代了托勒密提出的对点，避免了后者在物理真实性上的困难，从而解决了托勒密体系中的一系列问题。图西的设计在

后来哥白尼构建的日心体系当中扮演了重要角色。图西还构想过一种椭圆轨道的可能模型；确定了每年51″的岁差值；改进了包括星盘在内的几种天文仪器的构造。图西的学生库特丁·施拉兹在他的《天文学知识已有成就的局限》一书中讨论了日心体系的可能性。

偏心圆尽管没有“对点”那样离谱，但在物理真实性上仍然经不起推敲。试图净化托勒密模型中所有令人反感的性质，代之以能够从哲学上和实测上同时被接受的行星模型，这方面最出色的努力，是由马拉盖学派在大马士革的延续者沙提尔于公元1350年左右作出的。

沙提尔在《关于行星理论修正的最后调查》一书中，采用了图西的“双本轮”设计，不仅从“对点”中而且也从偏心圆中解脱了出来。沙提尔的行星模型最终摆脱了托勒密体系的束缚，而且还解决了托勒密体系中存在的严重困难。

例如，沙提尔的月亮运动模型便避免了托勒密模型中必然导致的月亮视直径的大幅度变化。沙提尔使用双本轮，选定合适的圆周半径和旋转速度，使得月亮在天球上的运动可以被很好地再现，而且月亮与地球之间距离的变化也适中了。避免了托勒密月亮运动理论中一个引人注目的缺点：即月亮与地球之间距离的变化多达2倍，因而导致月亮视直径大小变化应达4倍。

马拉盖学派早期的行星模型跟托勒密的模型在精度上大致相当，沙提尔的几何模型在精度上首次超越了托勒密的模型，也就是说与实测结果更为符合。能取得这样的成就，显然与沙提尔对待托勒密体系和整个天文学的基本态度有关。沙提尔非常重视测量精度和对理论进行实测检验。他是第一位为了在经验基础上检验托勒密模型而把实验引入行星理论的天文学家。例如，为了检测托勒密的太阳模型，沙提尔利用了月食观测估测托勒密的太阳圆盘视大小的数值。因此他的太阳运动模型基于对太阳视直径的新观测。

沙提尔首次把自然哲学从天文学中剥离了出来。他是在经验基础上而不是在哲学基础上拒绝托勒密的行星模型。他的工作标志着天文学研究的转折点，可被视为“文艺复兴之前的科学革命”。

到14世纪中叶，拉丁世界翻译阿拉伯著作的狂热已经衰落，欧洲在发展着他们自己的天文学传统，图西和沙提尔的著作在西方似乎鲜为人知。

然而非常巧合的是，哥白尼使用的日心模型，等价于图西在马拉盖天文台所发展的模型。尽管沙提尔的模型是地心的，但他消除了托勒密的对点和偏心圆，他的体系在数学细节上与哥白尼在《天体运行论》中所展示的相一致；他的月亮运动模型与哥白尼的也毫无二致。有人甚至这样说：哥白尼所做的改变只是把联结太阳和地球的矢量调

转了一个方向。

人们相信沙提尔的模型被哥白尼改编进了他的日心模型。但是人们还不确定这一切是怎么发生的。现在能够确定的是其中包含了被沙提尔所采用的图西“双本轮”设计的拜占庭希腊手稿在15世纪传到了意大利，而哥白尼从1496年起在意大利度过了8年的留学生涯。另外，哥白尼给他的日心模型所绘制的图形和其中点的标记几乎与沙提尔地心模型中所绘制的图形和点的标记完全一样。这一切给人的感觉是，哥白尼很可能熟悉沙提尔的工作。

第五章 哥白尼革命

希腊人的理性曾是人类的奇迹，但希腊人创造的科学文明又像是一个早产儿，从一开始就面临着各种危机。罗马人对希腊的征服就可以看成是希腊科学衰落的开始了。尽管如此，在罗马帝国的头几个世纪，在巨额财富的支撑下，学术还能维持一丝生机。但从公元410年8月24日起，西哥特人对罗马进行了三天掠夺，继而在公元476年日耳曼的雇佣军首领灭亡了西罗马帝国，529年东罗马皇帝查士丁尼封闭了雅典的柏拉图学院，641年阿拉伯人攻陷了亚历山大城，古代希腊罗马文化的据点一个一个地消失在战火烽烟之中。欧洲的文明史就此进入了一个漫长的停滞时期。

1.中世纪欧洲天文学

公元5世纪前后，迦太基人马丁内斯·卡佩拉（约365—440）在他的著作《语言学和墨丘利的联姻》中，通过一个天堂婚礼的寓言，用婚礼中七个女傧相分别代表文科七艺，即算术、声乐、几何、天文、语法、修辞、逻辑，并给出了一个包括天文学在内的文科七艺的概述。这是当时用拉丁文写成的关于天文学的最好论述。



图5.1　公元11世纪一份佛罗伦萨手稿中给出的卡佩拉体系。

从中可以看到卡佩拉在托勒密体系基础上作出的一个调整：金星和水星被设置成太阳的卫星，太阳带着金、水二星绕地球旋转，金星和水星绕太阳转动的天层是相交的，并又都与太阳绕地球转动的天层相交。三颗外行星（火星、木星和土星）则按照托勒密体系给出的方式绕地球转动。

经历了一段黑暗时期之后，西欧的一些地方重新建立起了秩序，人们渴求知识的热情高涨起来。这时阿拉伯人继承和创造的知识显示

了其特殊的历史地位。阿拉伯人建立的几乎包围地中海的庞大帝国，使得他们与欧洲有多条接触和交流的途径。阿拉伯知识通过叙利亚、意大利南部和西西里，特别是西班牙等各条途径流向欧洲的各个主要城市，在一些地方形成了阿拉伯学术的研究中心。一些学术界的精英人物都从事阿拉伯学术的介绍、翻译和研究工作。

从阿拉伯文翻译过来的天文学著作使得原先的拉丁天文课本相形见绌。霍利伍德的约翰（约1195—1256）—他的拉丁名字萨克罗玻斯克更为人们熟知，在13世纪中叶任教于巴黎，为了教学所需，他撰写了三册短小的天文学作品：其一是关于时间计算的《概论》；其二是满足天文学计算之需的《算术》；其三是《天球》。



图5.2　萨克罗玻斯克的《天球》。

包括四篇，第一篇研究天球，天球的旋转，地球的球形和它的中心位置；第二篇定义了天体的赤道、黄道、黄道带、黄道带上的星座、子午线、天极的地平高度，以及地球上回归线和极圈的划分；第三篇研究了天体的升和落，白昼和夜晚在不同纬度和季节条件下的长度；第四篇给出了太阳、月亮和行星运动的简短描述，给出了交食理论的纲要。

天文学在中世纪欧洲还完成了一个重要变化，那就是跟基督教结合。在1493年出版的世界历史《纽伦堡编年史》中我们可以看到一个基督教化了的宇宙。



图5.3　基督教神学下的宇宙体系：中心是四元素区，环绕中心的是七个行星天球，之外是恒星天球。亚里士多德主张的第一推动者也被反映在这个宇宙体系中：在恒星天层之外我们可以看到上帝正在加冕，旁边环列着9个等级的天使。

将亚里士多德的天球合并到基督教的宇宙图景中，产生了一个以既神圣又世俗的知识为基础的宇宙学，它具有很强的说服力。但是在7个行星天球层之外仍有不少问题。恒星球体的复合运动是如何得出的？这个球体和根据《创世纪》的故事在第一天创造的“上天”之间是什么关系？另外，除了基本的8个天球（7个行星天球和1个恒星天球）外，天文学家还需要增加一个天球来说明岁差——如果他们相信岁差速率是变动的话就需要两个，而神学家需要更多的天球来适应《创世记》中对天的描述。

15世纪中期欧洲印刷术和铅活字的发明，一方面使得古代著作的学术编辑值得认真对待，并有效减少了传抄过程中的错误；另一方面印刷书籍也可以较为廉价地获得。奥地利宫廷星占学家乔治·普尔巴赫（1423—1461）的《行星新理论》在1474年付印，变成了极为畅销的教科书。该书将托勒密的行星模型用实心球详细给出了“物理真实替代物”，哥白尼也许正是看到了这种替代的缺陷从而萌发了从事天

文学研究的动力。

普尔巴赫和他的朋友雷纪奥蒙塔努斯（1436—1476）开始对《至大论》进行节略，普尔巴赫去世后雷纪奥蒙塔努斯继续工作，完成了《至大论纲要》。该书篇幅为原著的一半，是简洁的典范，于公元1496年付印；随着该书在欧洲的广泛流传，托勒密的数理天文学终于变得不再是养在深闺、不可触摸的稀罕物事了。

雷纪奥蒙塔努斯原名约翰内斯·穆勒，1471年起定居在纽伦堡。1474年他出版了第一本《天文年历》，给出了从公元1475到1506年每天的天体位置，这是当时地理大发现时代航海船只的必备手册。哥伦布在第四次航行时携带了雷纪奥蒙塔努斯出版的《天文年历》。他在牙买加遭遇了当地土人的敌对情绪，哥伦布利用雷纪奥蒙塔努斯对1504年2月29日月蚀的预测，谎称能救回牙买加人的月亮。相信是哥伦布的祈祷挽救了月亮，土人们给了他和他的船员们很多必要的食物。

2.哥白尼和他的《天体运行论》

哥白尼（1473—1543）早年在波兰的文化中心克拉科夫学习数学和绘画。1496年起哥白尼到意大利游历，10年内先后在波洛尼亚、帕多瓦和斐拉拉等三所大学里攻读医学和宗教法规。

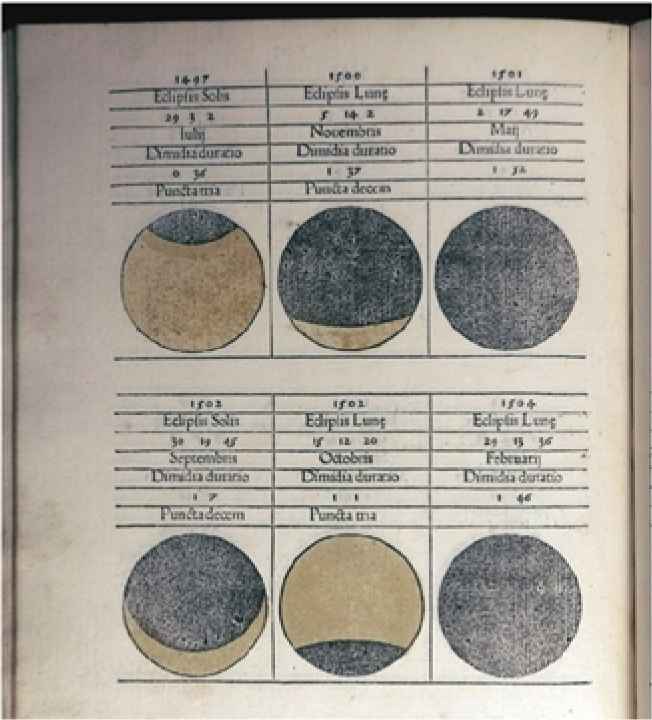


图5.4　雷纪奥蒙塔努斯《天文年历》中对1504年2月29日月蚀的预测。

在波洛尼亚期间，哥白尼与该校天文学教授迪·诺瓦拉（1454—1504）有密切的接触，后者正是在自然哲学中复兴毕达哥拉斯思想的领袖。



图5.5　哥白尼全名尼古拉·哥白尼,1473年2月19日诞生于波兰托伦的一个富商之家。10岁丧父后，由其一位兼任主教的舅父抚养。

当时的意大利是欧洲文艺复兴的中心，学者们向古希腊的遗产汲取思想的源泉，并在自由的氛围里对诸多现存的僵化学说和制度提出批评和挑战。在天文学上，托勒密的学说就是这样一种被批评的对象，人们讨论它的错误和改进它的可能性。

为了更准确地描述和预测行星的运动，托勒密的后继者们引入了越来越多的本轮，其体系的复杂程度大大背离了毕达哥拉斯派的柏拉图主义所追求的数学上的简单和完美性。哥白尼在思想上倾向于毕达哥拉斯派，认为天体应该有简单完美的运动，也应该有简单完美的数学描述。

在哥白尼看来，托勒密体系在这一点上还不能算“合格”。尤其是托勒密引入的对点，使得天体不再作匀速圆周运动。所以他想到如果宇宙的中心是太阳而不是地球，那么对天体运行的理解和描述就可能会简单得多，同时也能遵守希腊人的完美运动原理。

1505年哥白尼返回波兰，任弗洛姆布克天主教堂的教士。在繁杂的行政事务工作之余，他开始思考如何把宇宙中心移到太阳上去。从1512年起他开始在新假说基础上推算行星的位置。1530年左右哥白尼将他的学说写成概论，以手稿的形式在欧洲学者间广泛流传。在这份名为《关于天体运动假说的要释》的手稿的绪论中，哥白尼明确指出：“托勒密的理论，虽然与数值计算相符，但也吸引了不少疑问。的确，这种理论是不充足的……天体既不是沿着载运它的轨道，也不绕着它自身的中心在作等速运动。因此，这样的理论，既不够完善，也不完全合理。”这里哥白尼承认托勒密体系对天体位置的预测是有效的，但是违背了希腊天文学和哲学中的完美运动原理。哥白尼接着说：“我注意到了这一点，于是就常常想，能不能找到这些圆的一种更合理的组合，用它可以解释一切明显的不均匀性，并且如同完美运动原理所要求的，每个运动本身都是均匀的。”最后哥白尼还不忘强调了一下：“大家不要以为，我们是和毕达哥拉斯学派一样草率地主张地球运动说；在我关于圆的论述里人们会找到严格的论证。”但是哥白尼迟迟不公开正式发表他的详尽的严格论证。后来在数学家雷梯库斯（1514—1574）的强烈要求下，哥白尼最终同意出版他的全部论证。传说第一本书送到哥白尼手里几小时之后，他就与世长辞了，那是1543年5月24日。

该书的初版被冠以《托伦的尼古拉·哥白尼论天球的运行（共六卷）》这样一个名称，后来一般简称为《天体运行论》（严格的叫法应该是《天球运行论》）。哥白尼学说的革新内容主要在《天体运行论》的第一卷中得到描述。在这内容丰富的第一卷中哥白尼描绘了他的宇宙图景：太阳位于宇宙的中心，水星、金星、地球带着月亮、火星、木星和土星依次绕着太阳运行，最外围是静止的恒星天层。根据这幅宇宙图像，哥白尼可以很简洁地解释行星视运动中的“留”、“逆行”等现象，以及水星和金星的大距。而在托勒密体系中，为了解释同样的现象，需要引入许多特设的假定，从而破坏理论的完整性。

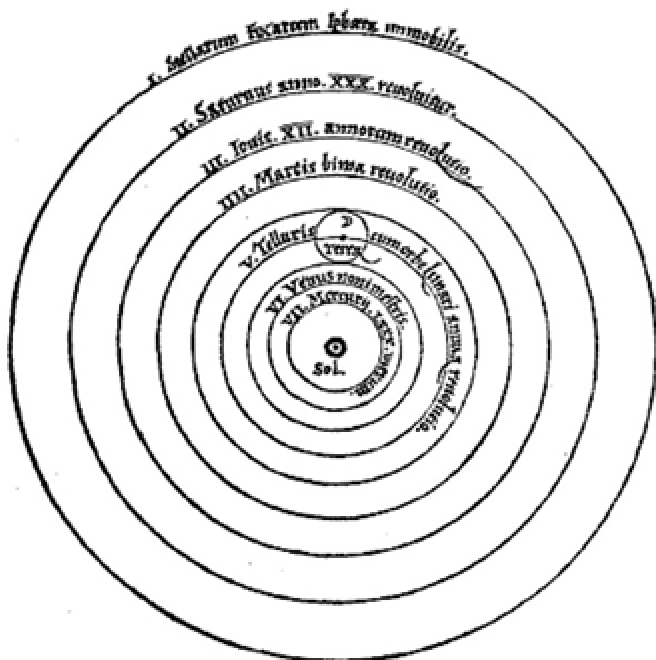


图5.6　哥白尼的日心体系。

哥白尼声称他的宇宙体系比托勒密体系优越，是因为他的体系更简单和完美。

这点在《天体运行论》的第一卷中得到了淋漓尽致的体现，但从第二卷开始到第六卷中的论述却在简单和完美性方面打了折扣。在具体描述和推算行星的运动时，哥白尼也不得不引入偏心圆和本轮，从而在数学上，太阳不能理直气壮地成为行星的绕转中心了。

毋庸讳言，哥白尼从托勒密那里获益匪浅，他从《至大论》中得到了许多观测数据和几何方法，以及编制星表的资料。

有些问题的处理完全因袭《至大论》。哥白尼甚至比托勒密还接近古希腊的天文学家和哲学家，他坚持用匀速圆周运动这种天体所应有的“完美运动”来描述行星的运动。以至于当代一些学者评论说，《天体运行论》与其说是在解释宇宙，还不如说是在解释托勒密。

《天体运行论》初版的序言称该书只是提供了一种解释行星运动的数学方法。

据考证，这篇序言不是出自哥白尼原意，而是监督该书出版的路德派教士奥西安德擅自加入的。把哥白尼体系看成是一种数学模型，还是一种宇宙的真实图景，这将直接影响教会对《天体运行论》的态

度。



图5.7　波兰画家Jan Matejko（1838—1893）画作：《天文学家哥白尼，与上帝对话》。

《天体运行论》出版之后，只有少数学者接受哥白尼的学说，影响还很有限，并未构成对纳入经院学派的托勒密学说的冲击。并且按照当时的物理学和天文学知识还无法理解地球在运动这一事实。哥白尼学说遭受着各种“合理”的责难。如果地球在绕太阳运动，那么应该可以观测到恒星的位置有一个周年的变化，上抛的物体不该掉到原地，地球有被瓦解的危险等等，对这些问题的解答确实要等到物理学和天文学进一步发展之后。事实上1822年教庭正式裁定太阳是行星系的中心的时候，恒星周年视差并没有被发现。直到1838年白塞尔用精密的仪器证实了恒星周年视差之后，才直接证明了地球确实是在绕太阳运动。

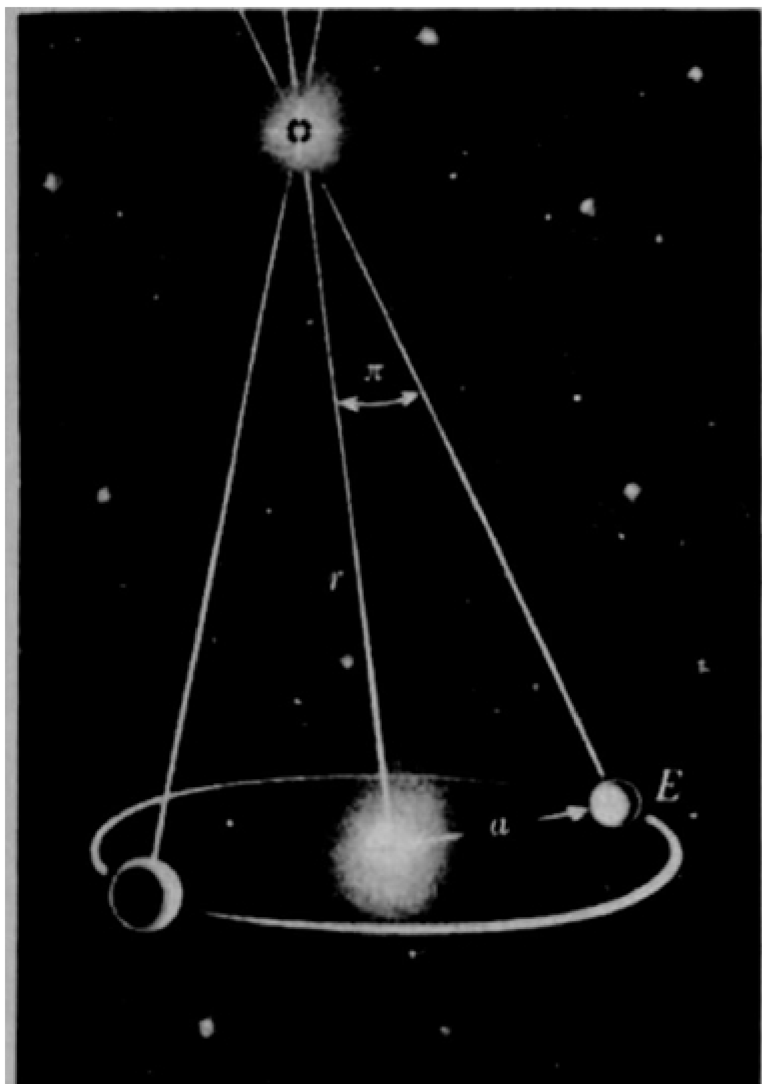


图5.8　恒星周年视差示意图。以日地距离a为基线的两端对遥远恒星形成的张角π被定义为恒星的周年视差。

从科学史的角度来看，哥白尼的地动思想不是什么独创。因为在古希腊天文学体系当中，并不是所有的体系都是“地心系”的。萨摩斯的阿利斯塔克就提出过日静地动的思想。然而在托勒密体系被钦定为唯一正确的宇宙学说之后，哥白尼再提出一个地动日静的学说，并在几何严格性方面堪与托勒密体系相匹敌，确实需要非凡的见识和勇气。从某种程度上说，哥白尼学说在思想方法上给予后人的深刻启发，甚至大于它在天文学上的影响。

哥白尼《天体运行论》的出版，标志着始于公元前4世纪柏拉图主义色彩的对行星几何模型的追求达到高潮，也标志着这种几何风格的结束。这种几何风格的主要兴趣在于行星是如何运动的，而不在于是什么使它们运动的。

哥白尼在其目的、方法和技术上都是一个传统主义者。但是他的《天体运行论》带来了新的问题：何以稳定的地球不仅可以旋转，而且当它疾驰穿过空间时，它的乘客根本感觉不到正在发生的一切？还有地球何以成为球形？

哥白尼改进了行星运动学问题的解决，但是产生了动力学上的新问题——是什么原因使得行星特别是地球运动起来的？在回答这些问题的过程中出现了四个关键的人物：第一个是第谷，他的主要贡献在于给出了精确和完备的观测。第二个是开普勒，他将天文学从几何学的应用转换成了物理动力学的一支。第三个是伽利略，他利用望远镜揭示了天体隐藏着的真相，并且发展了运动的新概念，巩固了哥白尼的主张。第四个是笛卡尔，他构想了一个无限的宇宙，在这个宇宙里没有什么位置和方向是特殊的，太阳只不过是我们的区域性的恒星而已。

3.第谷的精密天文学

1572年11月，大自然送给了人类一个惊奇：一个像星一样的物体出现在仙后座，甚至白天都能看见。天上出现一颗新星？这是前所未闻的。权威的亚里士多德宇宙学早有教导：天空不会有新生事物。



图5.9　第谷于1546年12月14日出生于一个丹麦的贵族家庭，还

是一个孩子时就进了哥本哈根大学。一次在预报时间里发生的日食引起他对天文学的兴趣，于是他不顾正常学业，找来托勒密的著作读起来。以后他在多所大学求学，求教于第一流的数学和天文学教师。

第谷对这颗“新星”作了详细观察，他的观测表明它在月亮上面很远的地方，所以是天体。第谷认识到了问题的关键：这个“天体”和亚里士多德的彗星理论相矛盾。彗星来了还会走，属于四元素区域内的变化，所以从从亚里士多德时代开始就认为彗星是地球质的物体，而不是天体。

第谷现在证明了这种变化可以发生在天上。因此他自己许下诺言，如果有一天彗星出现，他将仔细测量它的高度。

1577年大自然满足了第谷的愿望：一颗明亮的彗星真的出现了，第谷的观察表明它是天体，它位于行星际空间。然而如果是这样，它就是正在毫不费力地穿过被认为携带着行星绕着中心地球运动的那些看不见的天球层。这使得第谷彻底明白了：这些球体实际上根本不存在。但是，如果这些天球是不存在的，行星是在轨道上独立运行着的天体，这对于解释它们的运动原因将是很困难的。结果为了给出一个答案，天文学家不得不从运动学转向动力学，从几何学转向物理学。

图5.10　反映1577年大彗星的版画。

第谷一直在致力于仪器和观测技术的基本改革。为此目的，他将需要王室级别上的资金资助。1575年第谷拜访了黑森伯爵威廉四世—

也是一位非常热心的天文观测者。可能是在伯爵的推荐下，次年第谷被丹麦国王授权掌管了在丹麦海峡的汶岛。在那里，第谷有了空间、时间和财政来源，建立了基督教欧洲第一个重要的天文台。当第一个天文台天堡（Uraniborg）显得太小时，第谷又在附近建造了第二个星堡（Stjerneborg）。第谷年复一年地建造、测试、调整、再测试他的仪器，直到能够使测量精度高于1′。

1588年丹麦国王去世，第谷不改挥金如土的习性，而各项津贴和俸禄被逐渐取消。到1597年他不得不举家迁离汶岛。

1599年鲁道夫二世赐予他一笔资金，将他安排在布拉格附近的一个城堡里。第谷在这里建起了一座天文台，并为将来的研究工作物色助手。这时开普勒应邀加入到第谷的工作。但是新天文台的工作还没有真正开始，第谷突然病倒，于1601年10月24日去世。

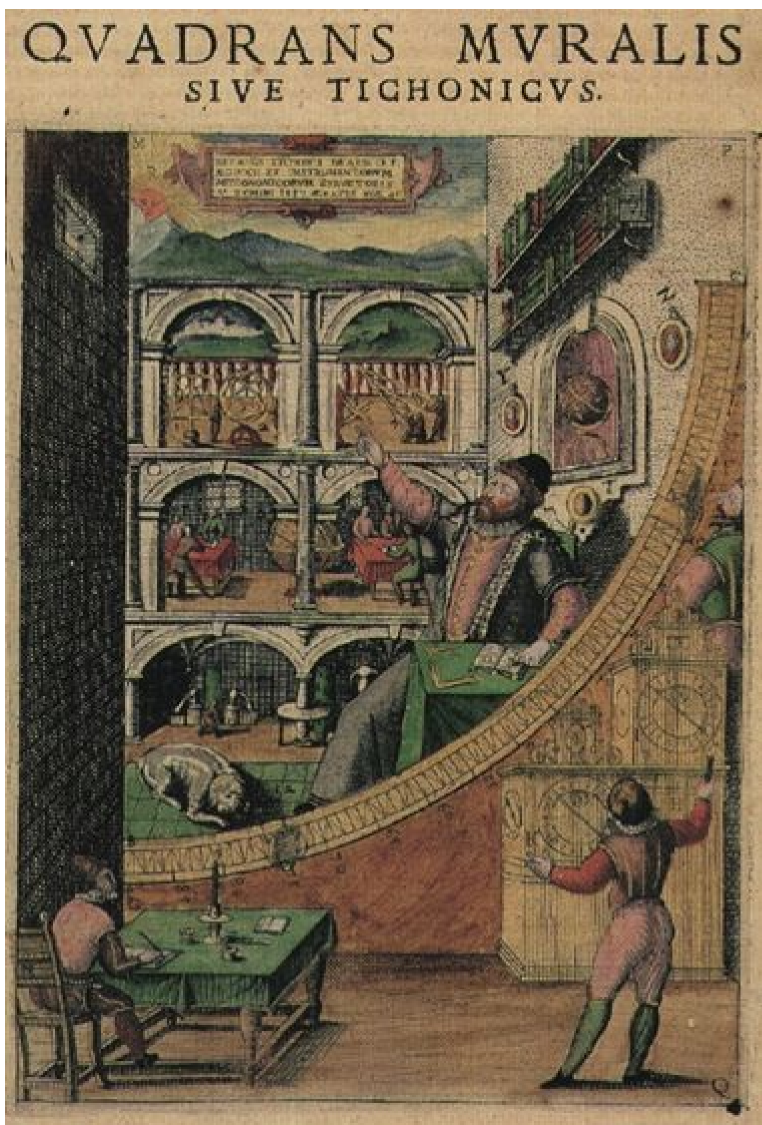


图5.11　描绘第谷工作的场景图。图中描绘了第谷天堡的大墙象限仪，背景有他的几件重要仪器和他的团队工作场景。

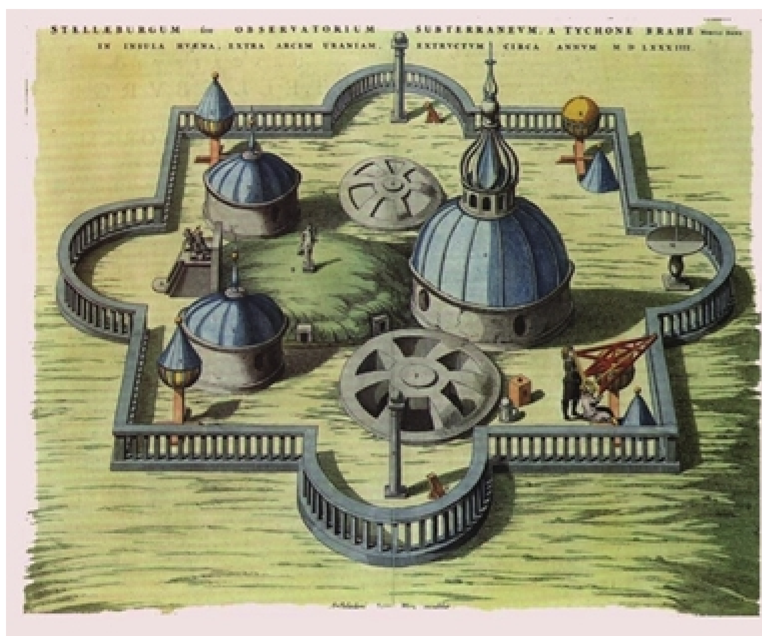


图5.12　第谷亲自设计的第二个天文台：星堡。

第谷的天文学工作主要在实测方面，他研究了精密天文学的大多数问题，包括研制建造高精度的天文仪器，获得精确而系统的观测资料，以很高的精度测定了许多重要的天文常数。但每一位天文学家都是潜在的宇宙学家，第谷也不例外。他对新星和彗星的观测结果表明，以亚里士多德哲学为基础的托勒密地心说是不能坚持了，但第谷也不接受哥白尼的日心说。

如果保留哥白尼提出的几何学方案，同时宣称地球是绝对静止的，那将兼备两大宇宙体系之长。于是他提出了一个后来被叫做第谷体系的宇宙模型。

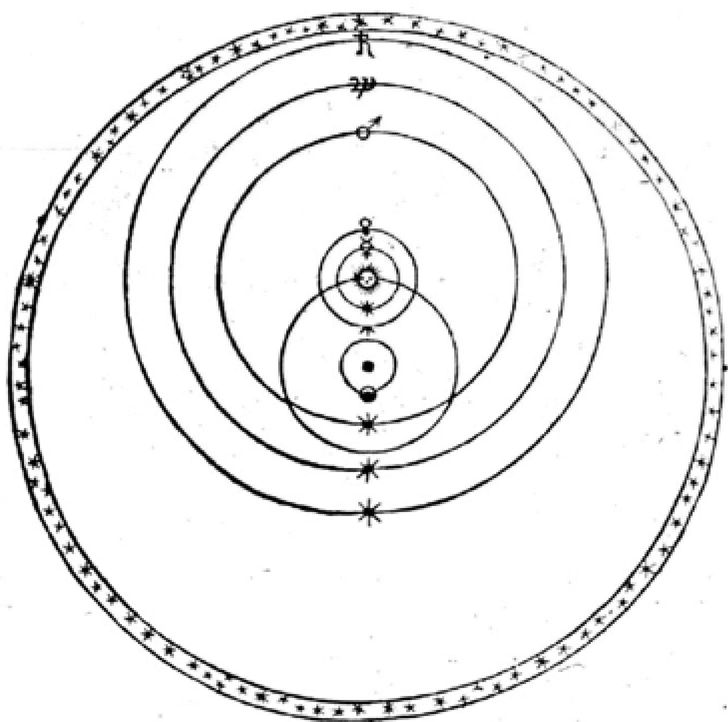


图5.13　第谷体系。水星、金星、火星、木星和土星围绕太阳旋转，太阳和月亮围绕地球旋转，地球仍是宇宙固定不动的中心，最外层是不同的恒星天层。

第谷不接受哥白尼学说的理由是，沉重而呆滞的地球在运动的说法与物理学的原理相违背，同时也不符合《圣经》的教义。再者，自古以来人们就知道，如果地球绕太阳转动，那么恒星的位置必将产生周年视差。但是从来没有人观察到过这种移动，第谷本人也无法测到它。而第谷有充足的理由可以为自己的观测精度感到满意。

关于第谷未能发现周年视差的原因有两种解释：或者哥白尼是错的，地球上的观测者事实上是静止的；或者是恒星太远了，以至于它们呈现的位移太小，依靠第谷的仪器还观测不到。第谷估计，在后一种情况下，恒星应当比最外层行星远700倍或更多。这将导致行星和恒星之间有一个巨大的空间断层–恒星能够在那么远的地方还显得那么大，它必须拥有非常大的体积。对于第谷，这样的一个宇宙是根本难以想象的。

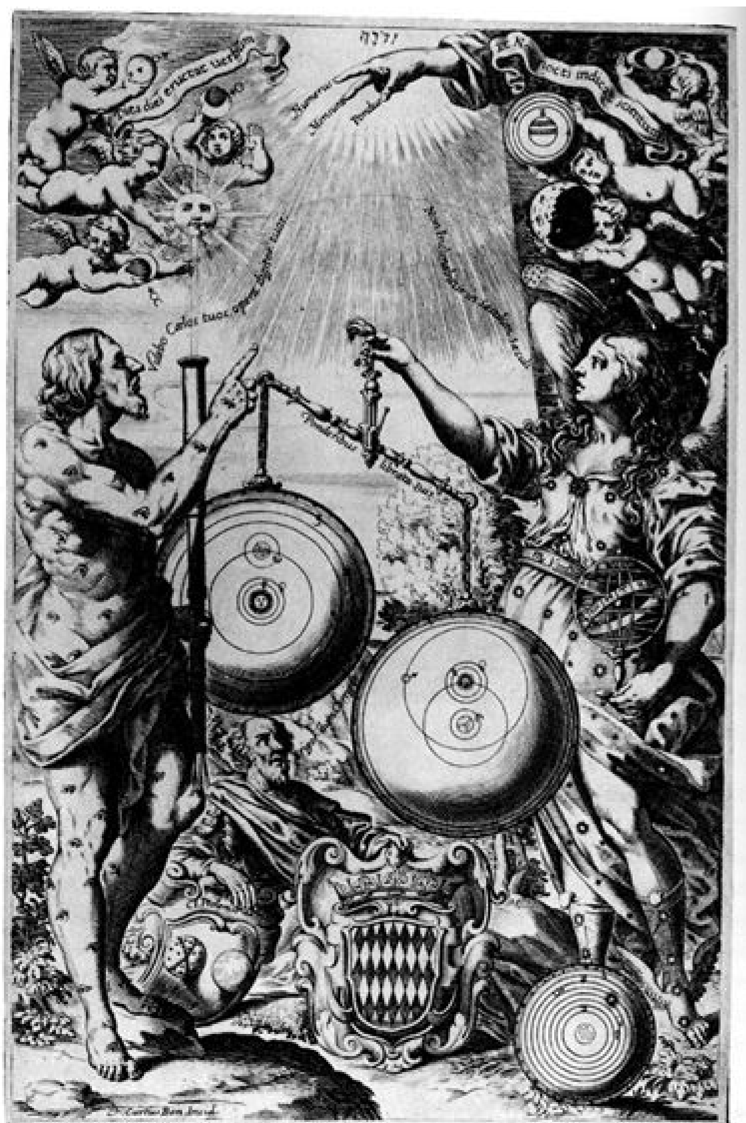


图5.14　耶稣会天文学家利乔里的大型天文学知识纲要《新至大论》的卷首插图，显示第谷体系在哥白尼体系比较中占据优势，而托勒密体系已经退出竞争行列了。

4.开普勒和行星运动定律

开普勒早期接受的教育主要是神学方面的，后来认识了数学和天文学教授梅斯特林，开始对数学和天文学感兴趣，并开始信仰哥白尼的学说。



图5.15　开普勒于1571年12月27日出生于斯图加特附近魏尔市的一个中等家庭。进图宾根大学，打算进入仕途，但他日趋自由的思

想使得他不宜在教会中任职，1594年他被提名出任格拉茨的数学教师。

激励开普勒进行研究的一个基本信念是：上帝按照某种先存的和谐创造世界，这种和谐的某些表现可以在行星轨道的数目与大小以及行星沿这些轨道的运动中追踪到。开普勒最初试图发现构成宇宙结构基础的简单关系而取得的一些成果载于《宇宙的奥秘》一书中。《宇宙的奥秘》遵循了柏拉图主义的信条：宇宙是按照几何学原理来构造的。

开普勒作了一系列正多面体，每个多面体有一个内切球，同时又是下一个正多面体的外接球。他发现，正八面体的内切和外接球面的半径分别同水星距离太阳的最远距离和金星距离太阳的最近距离成比例；正二十面体的内切和外接球的半径分别代表金星的最远距离和地球的最近距离。正十二面体、正四面体和立方体可类似地插入到地球、火星、木星和土星的轨道之间。

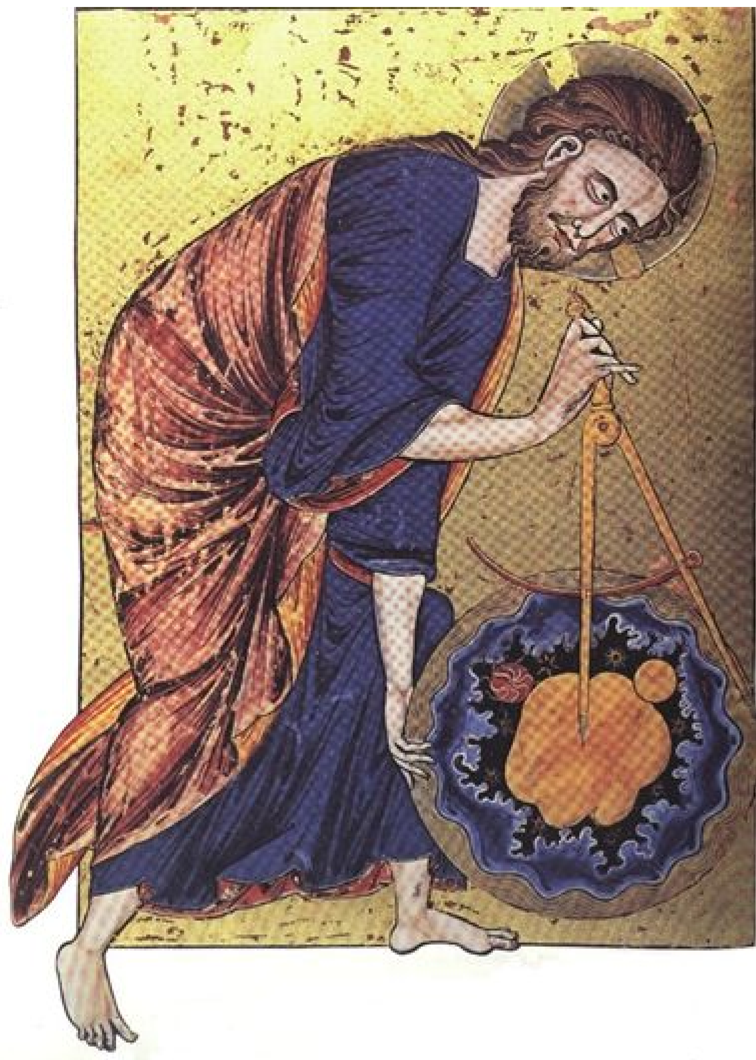
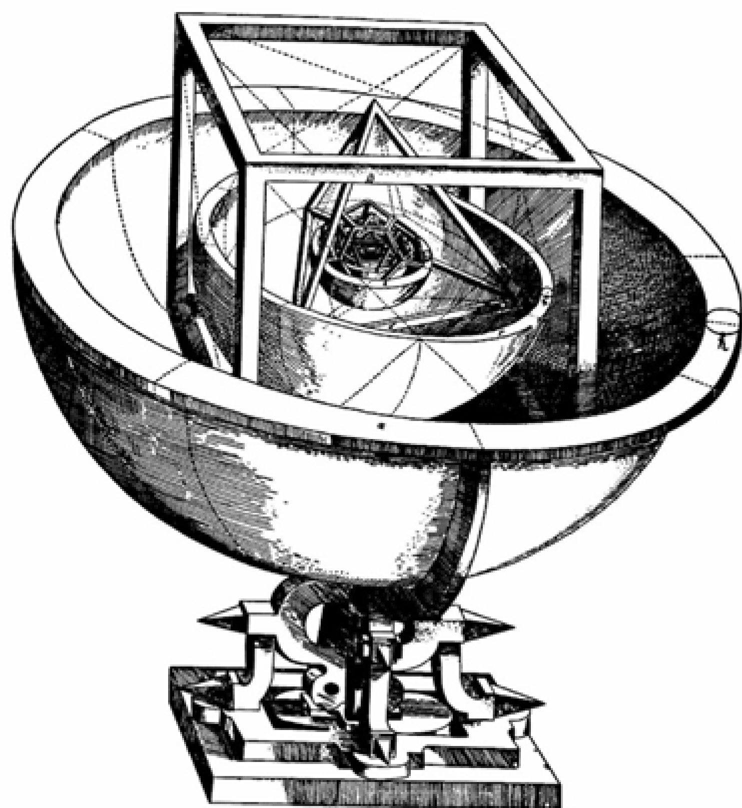


图5.16　上帝在柏拉图主义传统中是一位根据几何学原理创造宇宙的建筑学家。



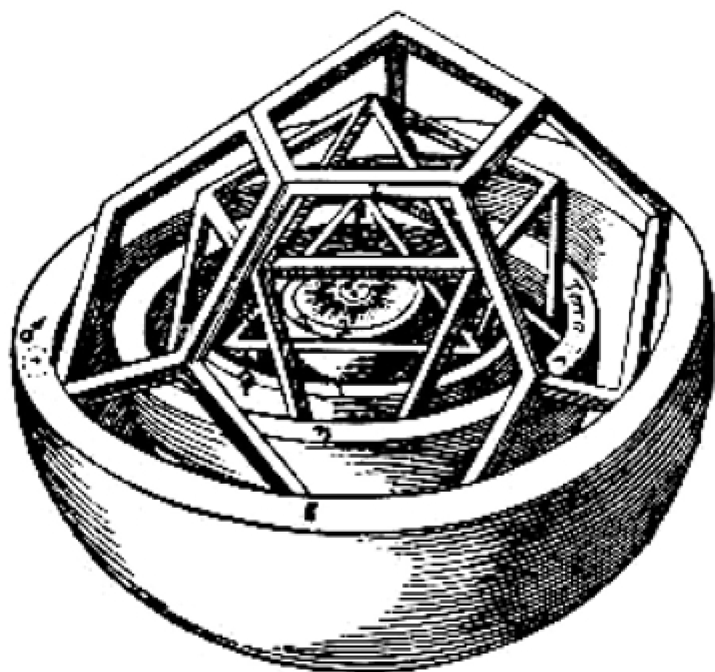


图5.18　开普勒的行星球模型（上）和内层放大（下）。

正多面体只有5种，而行星只有6颗，这很容易让人觉得两者之间联系的必然性。

在开普勒看来，这俨然是上帝创造宇宙的“秘方”。实际上根据开普勒这种构造计算出来的行星距离与观测所得并不完全一致，但开普勒在当时简单地把这种偏差归咎于观测的误差。

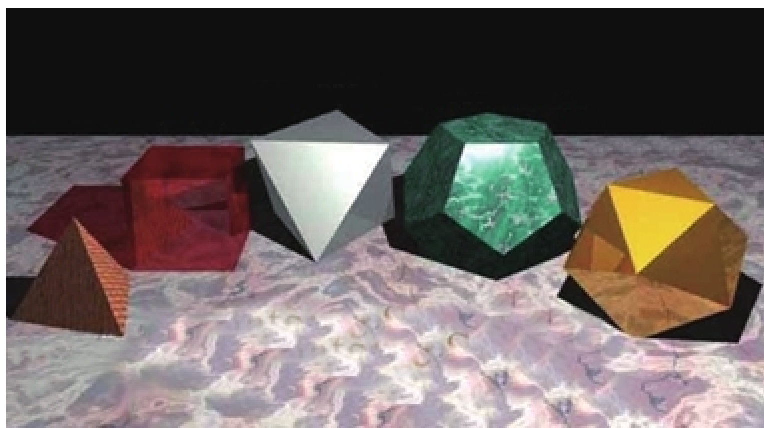


图5.17　五种正多面体，也叫做柏拉图立体。

第谷收到开普勒的书之后，对开普勒在书中展示出来的数学才能大为赞赏，也不以书中表现出来的哥白尼主义倾向为意，并写信热情邀请开普勒去汶岛与他一起工作，但是开普勒没有接受这个邀请。

当第谷在布拉格再次写信邀请开普勒前去的时候，这次开普勒去了，并在第谷的意外早逝之后接任了第谷原先担任的鲁道夫二世宫廷数学家的职位。



图5.19　开普勒在布拉格曾经居住过的房子。

开普勒最终能在行星运动理论上取得突破性的成就，获益于他能获得的三大遗产：哥白尼的日心体系、第谷的精确观测资料和吉尔伯特在《论磁》中表达的地球是一个磁体的思想。

通过“简直发疯似的思索”和大量的计算，开普勒终于获得了关于行星运动的第一定律和第二定律，发表于1609年出版的《新天文学：基于原因或天体的物理学，关于火星运动的有注释的论述》中。

在1619年出版的《宇宙和谐论》中他进一步发表了行星运动的第三定律。

ASTRONOMIA NOVA
ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΤΟΣ,
SEV
PHYSICA COELESTIS,
tradita commentariis
DE MOTIBVS STELLÆ
MARTIS,
Ex obſervationibus G. V.
TYCHONIS BRAHE:

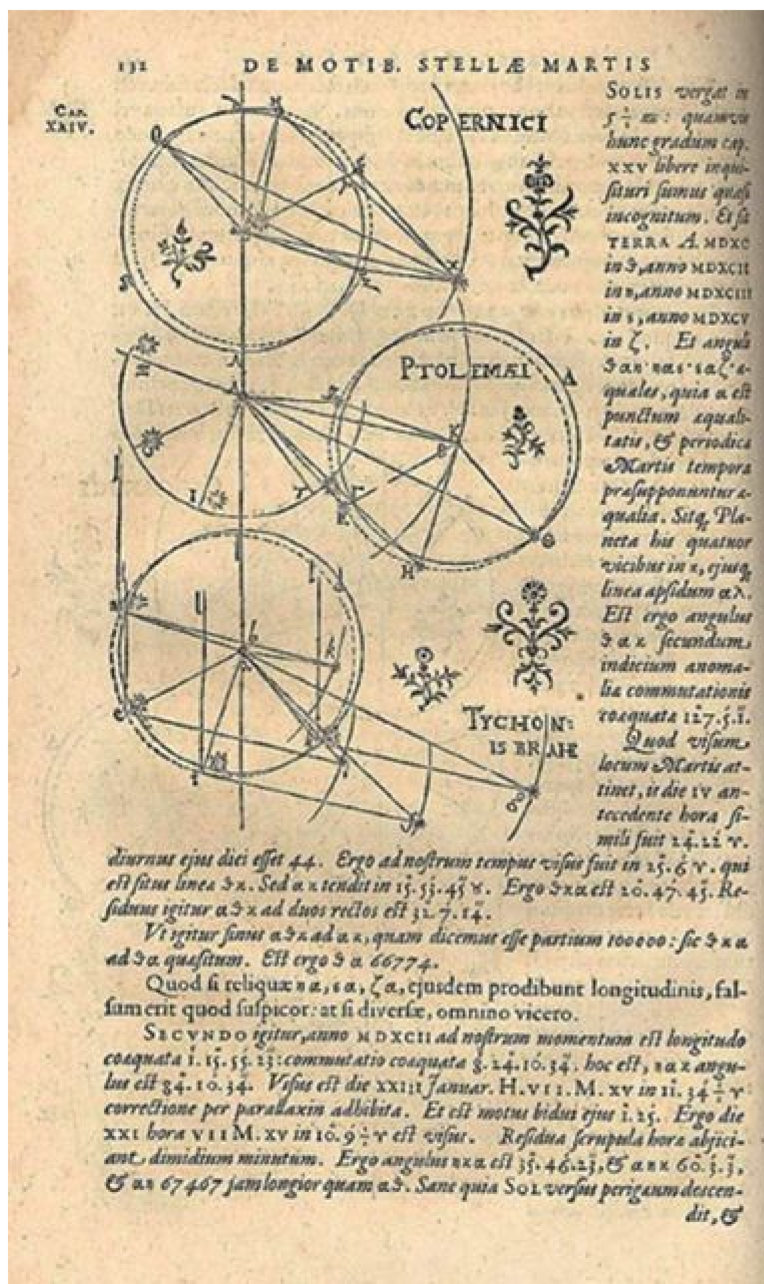
Juſſu & ſumptibus
RVDOLPHI II.
ROMANORVM
IMPERATORIS &c:



Plurium annorum pertinaci ſtudio
elaborata Pragæ,

A S^æ. C^æ. M.^tis S^æ. Mathematico
JOANNE KEPLERO,

Cum ejusdem C^æ. M.^tis privilegio ſpeciali
ANNO æræ Dionyſianæ CIↃ IↃC IX.



132 DE MOTIB. STELLÆ MARTIS

Cap. XXIV.

Solis vergat in 5 ½ ♍: quamvis hunc gradum cap. XXV libere inquisituri simus quasi incognitum. Et sit TERRA A MDXC in ϑ, anno MDXCII in κ, anno MDXCIII in ι, anno MDXCV in ζ. Et anguli ϑαη, ηαι, ιαζ æquales, quia α est punctum æqualitatis, & periodica Martis tempora præsupponuntur æqualia. Sitque Planeta his quatuor vicibus in κ, ejusque linea apsidum αδ. Est ergo angulus ϑακ secundum, indicium anomaliæ commutationis coæquata 127.5.1.

Quod visum locum Martis attinet, is die IV antecedente hora simili fuit 24.22 ♈. diurnus ejus diei esset 44. Ergo ad nostrum tempus visus fuit in 25.6 ♈. quis est situs lineæ ϑκ. Sed ακ tendit in 15.53.45 ♉. Ergo ϑκα est 20.47.45. Residuus igitur αϑκ ad duos rectos est 32.7.14.

Vt igitur sinus αϑκ ad ακ, quam dicemus esse partium 100000: sic ϑκα ad ϑα quæsitum. Est ergo ϑα 66774.

Quod si reliquæ ηα, ια, ζα, ejusdem prodibunt longitudinis, falsum erit quod suspicor: at si diversæ, omnino vicero.

SECUNDO igitur, anno MDXCII ad nostrum momentum est longitudo coæquata 1.15.55.25: commutatio coæquata 8.24.10.34. hoc est, ηακ angulus est 84.10.34. Visus est die XXIII Januar. H. VII. M. XV in 11.34 ½ ♈ correctione per parallaxin adhibita. Et est motus biduo ejus 1.25. Ergo die XXI hora VII M. XV in 10.9 ½ ♈ est visus. Residua scrupula horæ abjiciantur, dimidium minutum. Ergo angulus ηκα est 35.46.25, & αηκ 60.3.5, & αη 67467 jam longior quam αϑ. Sane quia SOL versus perigæum descendit, &

图5.20　《新天文学》封面和其中一页。

这三条行星运动定律现在一般表述为：（1）行星沿椭圆轨道绕太阳运动，太阳位于椭圆的一个焦点上；（2）从太阳到行星的矢径

在相等时间里扫过相等的面积；（3）各行星公转周期的平方与轨道半长径的立方成正比。它们被称作开普勒定律，为牛顿发现万有引力定律奠定了基础。

Ioannis Keppleri

HARMONICES MVNDI

LIBRI V. QVORVM

Primus GEOMETRICVS, De Figurarum Regularium, quæ Proportiones Harmonicas constituunt, ortu & demonstrationibus.

Secundus ARCHITECTONICVS, seu ex GEOMETRIA FIGVRATA, De Figurarum Regularium Congruentia in plano vel solido:

Tertius propriè HARMONICVS, De Proportionum Harmonicarum ortu ex Figuris; deque Naturâ & Differentiis rerum ad cantum pertinentium, contra Veteres:

Quartus METAPHYSICVS, PSYCHOLOGICVS & ASTROLOGICVS, De Harmoniarum mentali Essentiâ earumque generibus in Mundo; præsertim de Harmonia radiorum, ex corporibus cœlestibus in Terram descendentibus, eiusque effectu in Natura seu Anima sublunari & Humana:

Quintus ASTRONOMICVS & METAPHYSICVS, De Harmoniis absolutissimis motuum cœlestium, ortuque Eccentricitatum ex proportionibus Harmonicis.

Appendix habet comparationem huius Operis cum Harmonices Cl. Ptolemæi libro III cumque Roberti de Fluctibus, dicti Flud Medici Oxoniensis speculationibus Harmonicis, operi de Macrocosmo & Microcosmo insertis.



Cum S. C. Mᵗⁱˢ. Priuilegio ad annos XV.

Lincii Austriæ,

Sumptibus GODOFREDI TAMPACHII Bibl. Francof.
Excudebat IOANNES PLANCVS.

ANNO M. DC. XIX.

1st Edition 1st issue

6 plates on 5

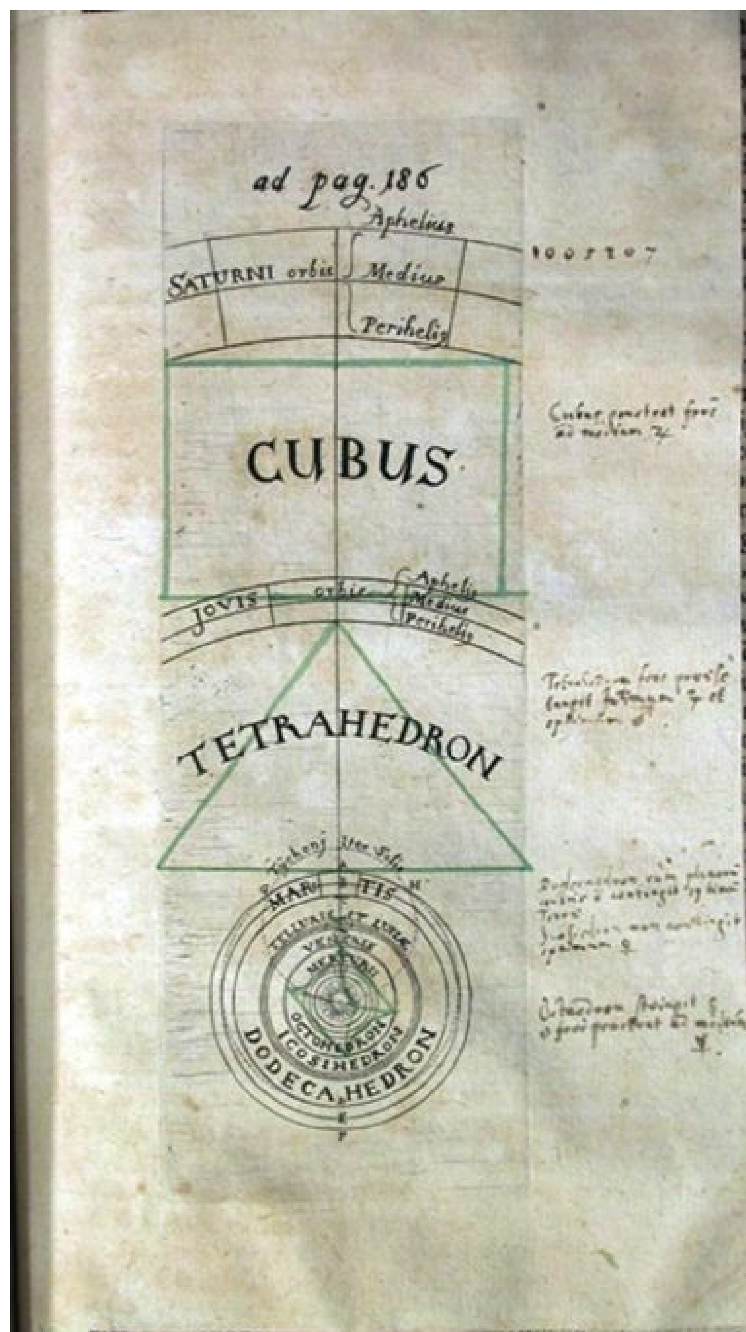


图5.21　《宇宙和谐论》初版封面，和其中的一页：开普勒用柏拉图立体展示行星天层之间的几何学和谐性。

就这样开普勒抛弃了从柏拉图以来认为天体只做匀速圆周运动的信条，并只用一根椭圆轨道就解释了行星运动的所有复杂性。差不多一个世纪以前，哥白尼已经开始寻找满足几何简单性要求的行星系统。开普勒解决了哥白尼的问题，他所达到的简单性在天文学史上超出了前人的梦想。偏心圆和本轮的全部复杂性淹没在椭圆的简单性中了。当然，接受椭圆的简单性是有代价的，那就是抛弃圆及其拥有的完美无缺、不易性和有序性的古老内涵。

然而所有的精彩只是理论上的，新理论并没有立刻获得人们的认同，即使是开普勒最志同道合的伽利略也没有接受椭圆对圆的替代。在实用方面需经历考验：能够据此编算更高精度的星表吗？第谷对天文学的兴趣正是由于对基于哥白尼模型的《普鲁士星表》感到不满意引起的。

1601年当第谷将开普勒介绍给鲁道夫二世的时候，皇帝就已经给他分派了任务，即和第谷一起制作一份新的行星历表，这份行星历表叫做《鲁道夫星表》。

《鲁道夫星表》完成于1627年，它的精确性在4年后惊人地显示出来。1631年11月7日，距开普勒去世一年，法国天文学家皮埃尔·伽桑迪首次观测到水星凌日。开普勒星表对该次水星凌日的推算误差仅仅只有太阳半径的1/3，但是被该表取代的哥白尼星表的误差是开普勒星表误差的30倍。如果开普勒星表确实是非常精确的，那么这个星表所依据的行星定律将是值得认真考虑的。

5.伽利略对哥白尼学说的支持

伽利略在两个层面上展开对哥白尼学说的支持。第一个层面是以通过望远镜作出的天文发现支持哥白尼学说。第二个层面是通过重新评价运动的概念，反驳了对地动说的经典驳难，从物理上支持哥白尼学说。

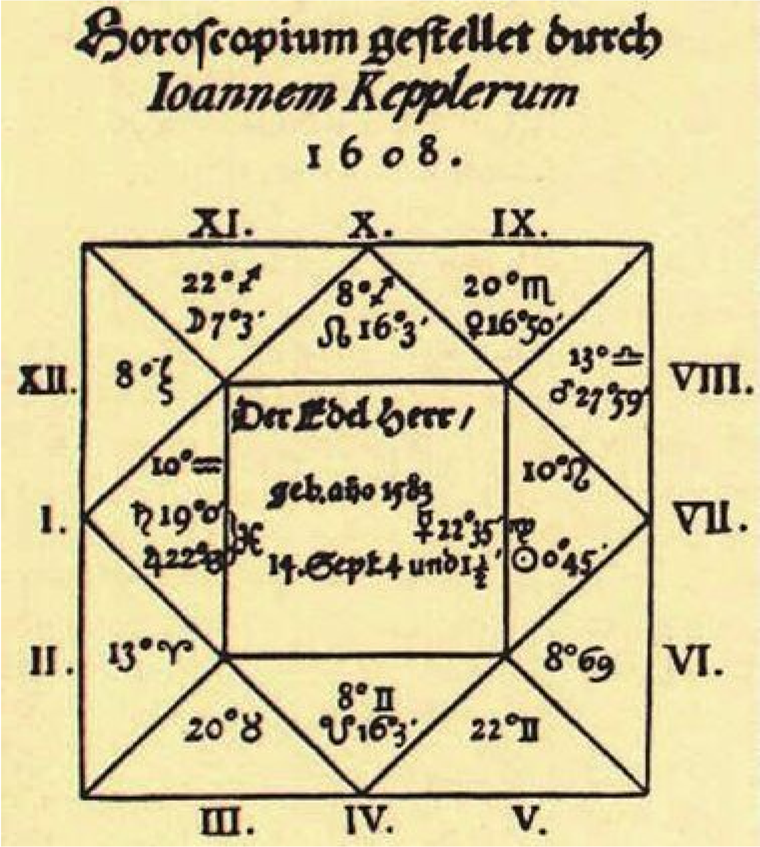


图5.22　开普勒给瓦伦斯坦将军（AlbrechtvonWallenstein）算命时作的算命天宫图。由于经济一直不宽裕，开普勒曾经说过：天文学这位母亲需要星占学这位女儿来养活。

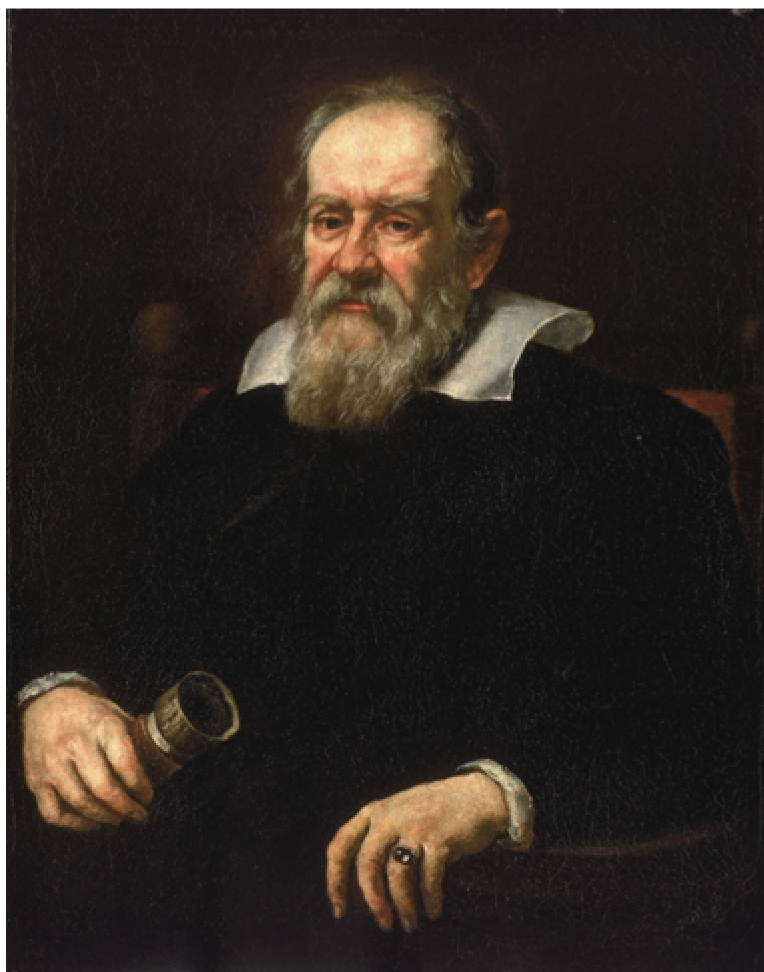
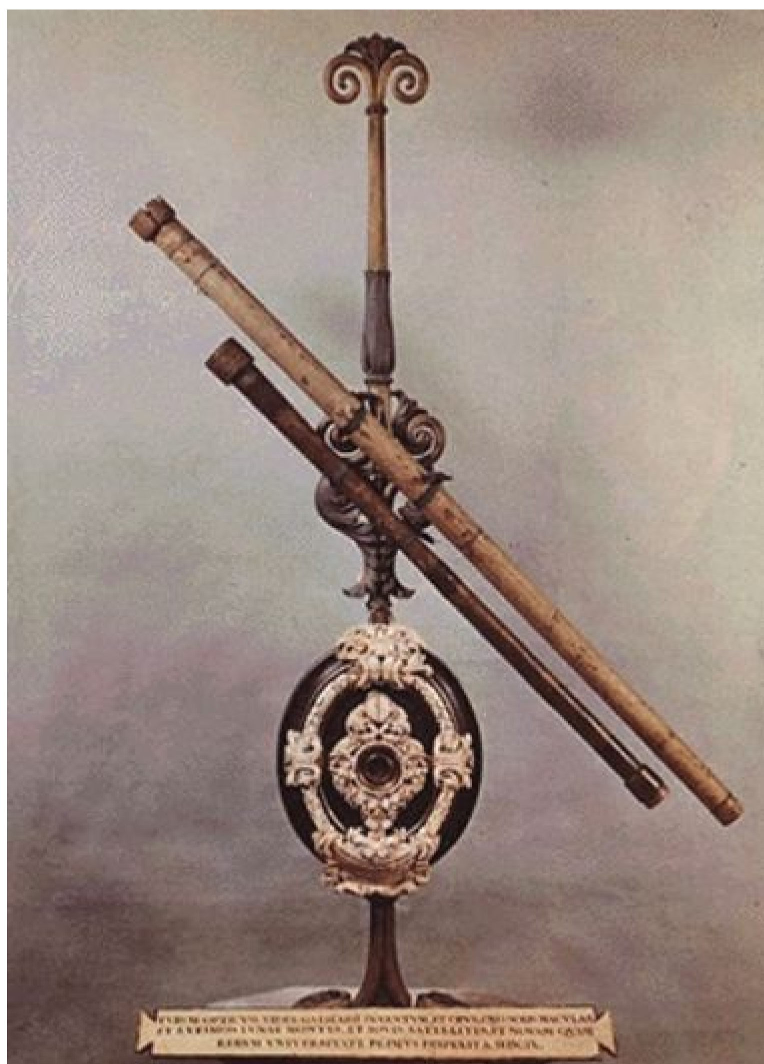


图5.23　伽利略于1564年2月15日生于比萨。1581年进比萨大学学习医学，随后转学数学，并成为比萨大学的数学教授。1592年起又到帕多瓦任数学教授，在那里任教了18年。1610年他凭借新近发明的望远镜所作出的发现，获得了托斯卡纳大公首席数学家和哲学家的职位，拥有这个职位直到1642年1月8日去世。

伽利略在1609年听说了荷兰人发明的一种玩具—望远镜，它用两块透镜的组合可以把很远处的物体“拉近”，从而看得更清楚。伽利略想到可以用望远镜来做天文观测，并且立刻亲自动手制造望远镜。在1610年出版的《恒星使者》一书中，伽利略介绍了他制造出第一架用于天文观测的望远镜的经过。据他自述，用这架望远镜观察物体时，“同肉眼所见相比，它们几乎大了一千倍，而距离只有三十分之一”。



5.24伽利略制作的两架望远镜，现藏佛罗伦萨博物馆。伽利略的望远镜本质上同荷兰望远镜一样，但是伽利略具备精深的光学知识，所以他的望远镜远比荷兰眼镜制造商们的制品好，以致荷兰人首先发明的这种望远镜后来被称作伽利略望远镜。



图5.25　伽利略向威尼斯总督展示如何使用望远镜。

当用望远镜观看恒星时，伽利略看到了许多肉眼无法看到的恒星。神秘的银河，现在他能解释为是由无数恒星所组成，因此证实了2000年前亚里士多德的思索。

伽利略还发现，尽管行星的视圆面可以按望远镜放大倍数而扩大，但对于恒星就不行了。这对于哥白尼主义者来说是个好消息。第谷已经估计过，为了解释探测恒星周年视差的失败，哥白尼主义者将不得不把恒星放置到700倍于土星距离以外的地方，并且为了在如此远处还呈现视圆面，这些恒星必须是非常巨大的。现在伽利略证明这些恒星的视圆面只不过是一种错觉。

伽利略还用望远镜发现木星有4颗卫星围绕它旋转；月亮表面跟地球表面一样山峰高耸。伽利略急于利用他的发现为他的学术生涯来一次提升。他只花了几个星期就完成了《恒星使者》的写作，宣布了那些令人震惊的消息。为了谋求托斯卡纳大公首席数学家的职位，伽利略把新发现的木星四颗卫星命名为“美第奇星”—而现在这四颗卫星

被叫做伽利略卫星。


SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, praesertim verò
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quae à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnasij Publico Mathematico
PERSPICILLI
Nuper à se reperti beneficio sunt obseruata in LVNAE FACIE, FIXIS INNUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,
Apprime verò in
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeritate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque diem cognitos, nouissimè Author depraehendit primus; atque
MEDICEA SIDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M DC X.
Superiorum Permissu, & Priuilegio.

图5.26　《恒星使者》封面。

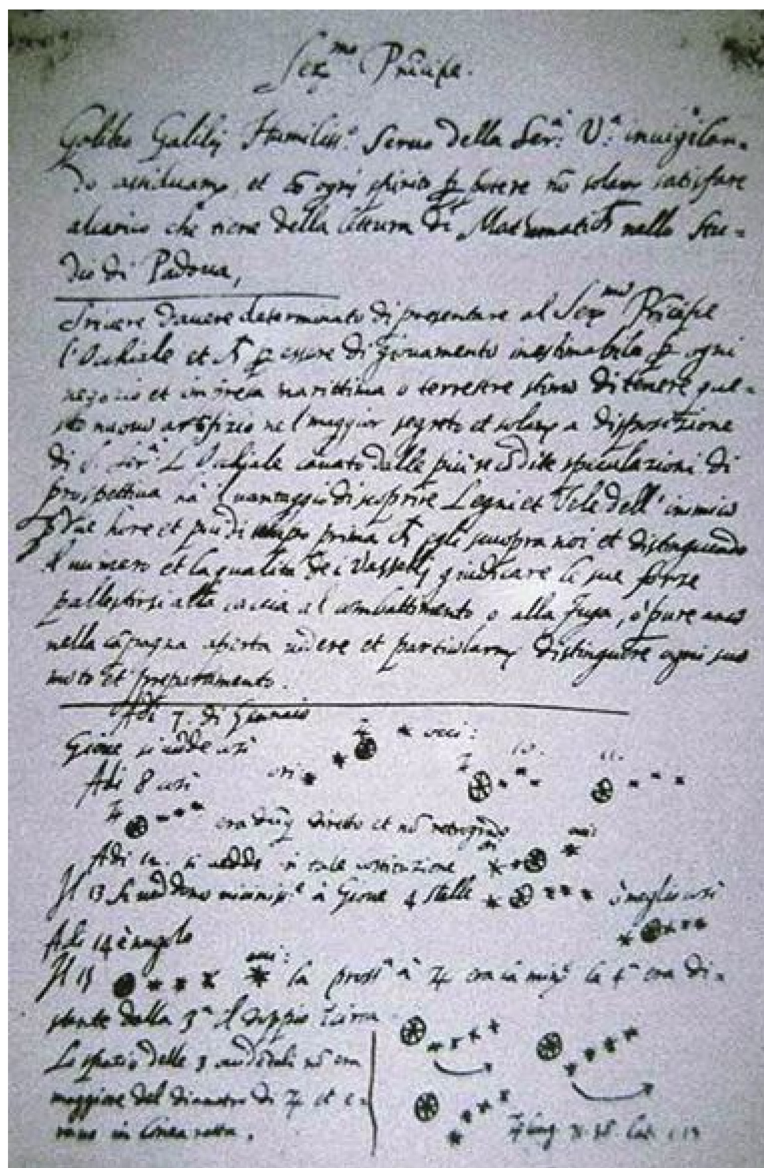


图5.27　伽利略发现木星卫星的手稿。早在《天体运行论》第一卷给出的哥白尼体系模型中就有一个严重的不规则现象，即地球一方面是一颗普通的行星，另一方面是唯一一颗带有一个卫星—月亮—而绕太阳旋转的。现在，望远镜揭示了还有另外的带着至少四个月亮的行星。木星卫星的发现使得哥白尼构想的太阳系有了一个令人信服的类比，并直接支持了哥白尼提出的宇宙没有唯一的绕转中心的猜想。

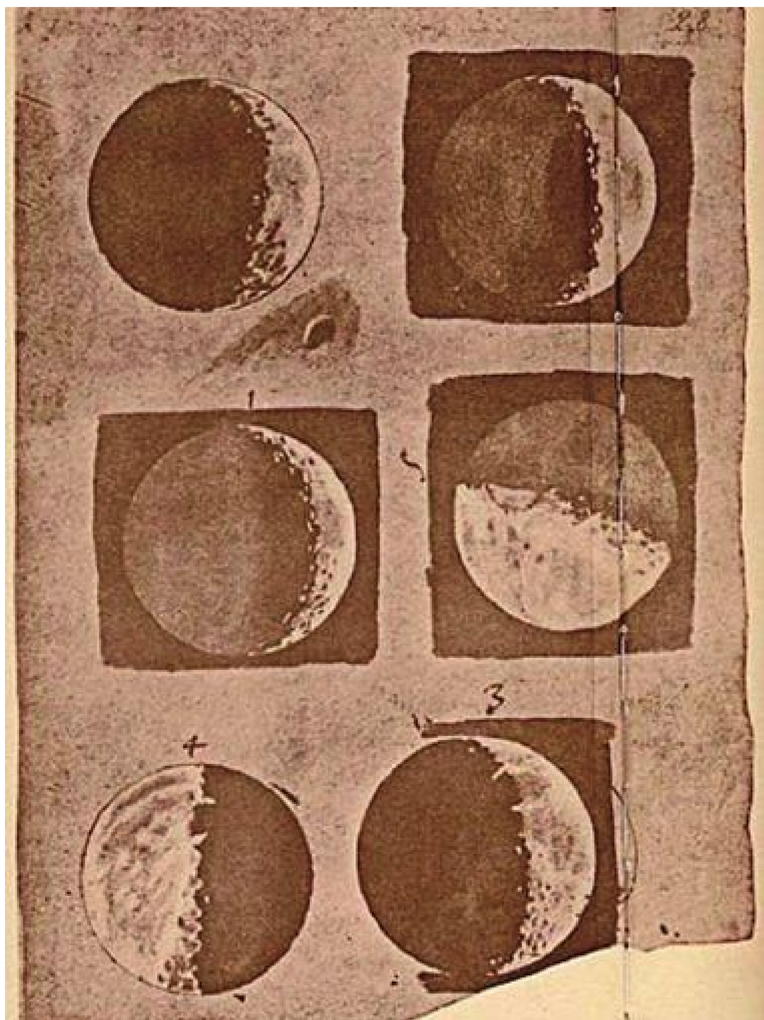


图5.28　伽利略在《恒星使者》中描绘的月亮表面。

伽利略还用他的望远镜作出了进一步的重要发现。伽利略发现在传统宇宙理论中作为完美象征的太阳，其表面实际上是“斑斑点点、不洁净的”，这就是太阳黑子的发现。伽利略正确地解释了太阳黑子应该附着在太阳表面，而不是像当时一些学者认为的是漂浮在太阳上空。

伽利略最重要的发现是金星有着与月相一样的位相变化，它有时呈现满月那样的圆面，有时则如一弯新月那样。这一现象完全不能与托勒密关于金星的几何学相容。

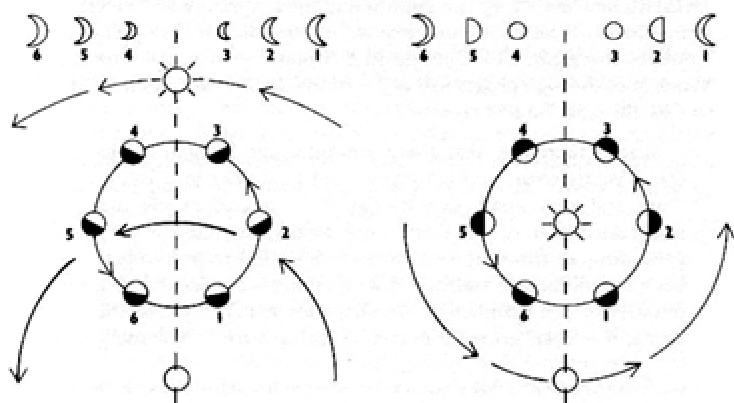


图5.29　托勒密体系（上左）与哥白尼体系（上右）对金星相位变化的解释。

伽利略对哥白尼学说的热情支持和宣传，最终导致罗马的宗教法庭采取措施。1616年宗教法庭宣布，《天体运行论》将被停止传播，直到它被修正为止。红衣主教罗伯特·贝拉明口头警告伽利略不可以再相信哥白尼体系是真实的，或为其辩护。



图5.30　现代照相镜头记录的金星相位变化，从2004年2月27日始，到2004年6月8日止。图片作者：StatisKalyvas，2004摄。

1623年伽利略的朋友红衣主教马费奥·巴尔贝里尼成为教皇乌尔班八世，伽利略以为事情出现了转机。1624年伽利略到罗马晋见了教皇。1630年伽利略再到罗马谋取他的一部新作的出版许可证。在通过了教皇指定的审查班子对书稿的审查之后，1632年伽利略的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（简称《对话》）获得正式出版。

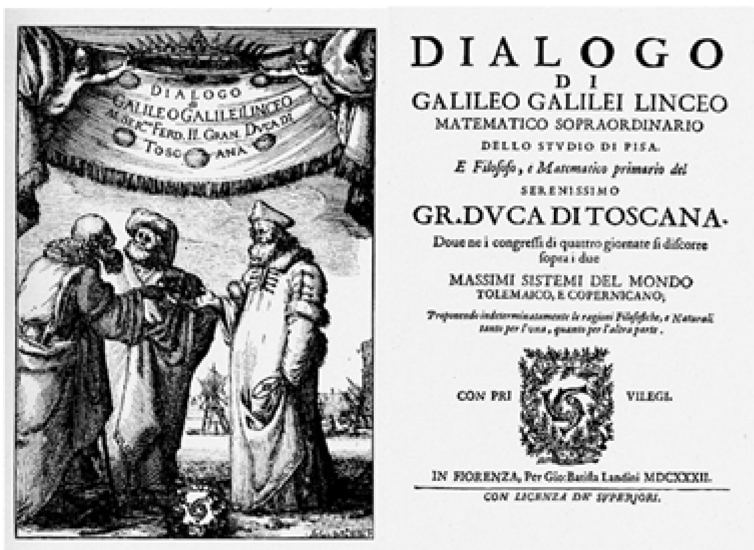

DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO
GR.DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.
CON PRI VILEGI.
IN FIORENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SVPERIORI.

图5.31　《对话》封面和扉页。

《对话》用意大利方言写成，对于哥白尼宇宙学的优点给出了精彩的陈述，并且有望远镜的证据支持。该书采用三个朋友之间对话的形式。萨尔维阿蒂代表伽利略；沙格列陀是个很有理性的人，他赞同萨尔维阿蒂的观点；辛普利丘是公元6世纪时亚里士多德著作的注释者，在书中扮演了传统和权威的捍卫者。这三个人在四天里作了四次内容广泛的谈话。第一天论证了地球和行星一样，是一个运动的天体；第二天讨论了周日运动；第三天讨论了周年运动；第四天讨论了潮汐问题。

哥白尼的地动学说曾经面临这样的驳难：如果说地球在自转的同时还在绕日公转，为什么我们完全感觉不到这种运动？

一支箭垂直射向空中，为什么又落回到原地？因为按照亚里士多德的论证，地面上的物体除了寻找其固有位置的自然运动之外，别的运动都需要外力。如果地面从西往东在移动，那么垂直落下的箭因为没有横向的作用力，势必要落在偏向西面的地方。然而事实并非如此，所以地球在箭飞行的时间内是没有移动的。

面对这种驳难，伽利略在《对话》中采取的一种釜底抽薪的策略，也就是重新评价运动的概念。对亚里士多德来说，非自然运动的强迫运动需要一个原因，因此要求一个解释；而静止是不需要原因的。

伽利略则对运动给出了一个不同的观点：并不是运动本身需要原因，而是运动的变化需要原因。稳定的运动包括静止这个特例是一种

状态，保持这种状态会感觉不到运动。这就是为什么地球上的人在地球绕太阳旋转的时候感觉不到自己的运动速度的原因。

伽利略在《对话》中提出了一个能够证明所有试图证明地球不动的实验都无效的思想实验：

设想把你和你的朋友关在一只大船的舱板下最大的房间里，里面招来一些蚊子、苍蝇以及诸如此类有翅膀的小动物。

再拿一只盛满水的大桶，里面放一些鱼；再把瓶子挂起来，让它可以一滴一滴地把水滴出来，滴入下面放着的另一只窄颈瓶子中。于是，船在静止不动时，我们看到这些有翅膀的小动物如何以同样的速度飞向房间各处；看到鱼如何毫无差别地向各个方向游动；又看到滴水如何全部落到下面所放的瓶子中。而当你把什么东西扔向你的朋友时，只要他和你的距离保持一定，你向某个方向扔时不必比向另一个方向要用更大的力。如果你在跳远，你向各个方向会跳得同样远。尽管看到这一切细节，但是没有人怀疑，如果船上情况不变，当船以任意速度运动时这一切应当照样发生。只要这运动是均匀的，不在任何方向发生摇摆，你不能辨别得出上述这一切结果有丝毫变化，也不能靠其中任何一个结果来推断船是在运动还是静止不动。

在封闭的船舱中做任何力学实验都不可能发现一只船是停泊在港口还是行驶在海上。这个说法现在称之为“伽利略相对性原理”。此后几乎花了300年时间，这个原理才由爱因斯坦推广到在任何作匀速运动的封闭系统中观测到的光学和电磁现象都是一样的。

伽利略在《对话》中表现出的支持哥白尼学说的鲜明立场最终导致了教皇不悦，不久他便被召唤到罗马，并指控他违反了1616年的法令。最后，伽利略以将危害天主教会今后的名誉为理由公开放弃了哥白尼学说，宗教法庭感到满意而判处他终身监禁，并命令他三年里每星期都要背诵《诗篇》中的七首忏悔诗。一开始他被监禁在好朋友锡耶纳大主教家里，后来被监视居住在佛罗伦萨附近他自己的家中。每周象征性的忏悔圣歌也由他女儿代替。《对话》在1835年被从天主教的禁书录中去掉。

6.笛卡尔的无限宇宙

在中世纪的大学里，亚里斯多德仅仅是“哲学家”，甚至到了伽利略时代，哲学家的影响仍然是主要的。因此，伽利略视他为主要敌人，离开对他的批评几乎不能写一页东西。笛卡尔是个自由的人，这意味着他的生活是游离于大学体系之外的。

他看到对亚里斯多德的战斗已经结束，已经不再经常提及他了。对笛卡尔来说，中心工作不是摧毁而是重建。



图5.32　19世纪画作《伽利略受审》。



图5.33　笛卡尔，1596出生于法国拉埃镇，1604年进当地一所耶稣会学校，一直学习到1612年。由于笛卡尔身体极差，学校特许他每天可以睡到上午11点起床。后来到巴黎布瓦杜大学读法律，毕业后应征进入一所军事学校。1618年笛卡尔师从德国物理学家依萨克·比克曼学习数学和力学，并开始寻求一种统一的关于自然的科学。1619年他加入巴伐利亚军队，从1620年到1628年他在欧洲各地包括波希米亚、匈牙利、德国、荷兰、法国游历，最后选定荷兰作为他的长久居住地，并开始潜心著述。



图5.34　瑞典女王克里斯蒂娜（左）和笛卡尔（右）。

1649年女王克里斯蒂娜久仰笛卡尔大名，要拜他为师，笛卡尔欣然前往，应聘斯德哥尔摩宫廷哲学家一职。但是勤勉的女王要每周三次在清晨5点学习几何学知识，笛卡尔不得不改掉自幼年起便养成的每天11点起床的习惯，在北欧凛冽的寒风中一大早就赶到女王宫殿。几个月后的1650年2月11日笛卡尔死于感冒引发的肺炎。

笛卡尔于1628年完成《指导哲理之原则》，1634年完成《论世界》，全书以哥白尼学说为基础，总结了作者在哲学、数学和许多自然科学问题上的看法。1632年罗马教会对伽利略的迫害传到荷兰，笛卡尔未敢出版此作品。因此该书直到1664年笛卡尔去世后才出版。1637年完成《方法论》，该书包含三篇独立成篇的附录：《折光学》、《气象学》和《几何学》，在《几何学》中笛卡尔提出了重要的“笛卡尔坐标系”概念，代数学从此可以运用到几何学中，解析几何因此得以奠定基础。1641年完成《第一哲学沉思录》。1644年完成《哲学原理》和《冥想录》。

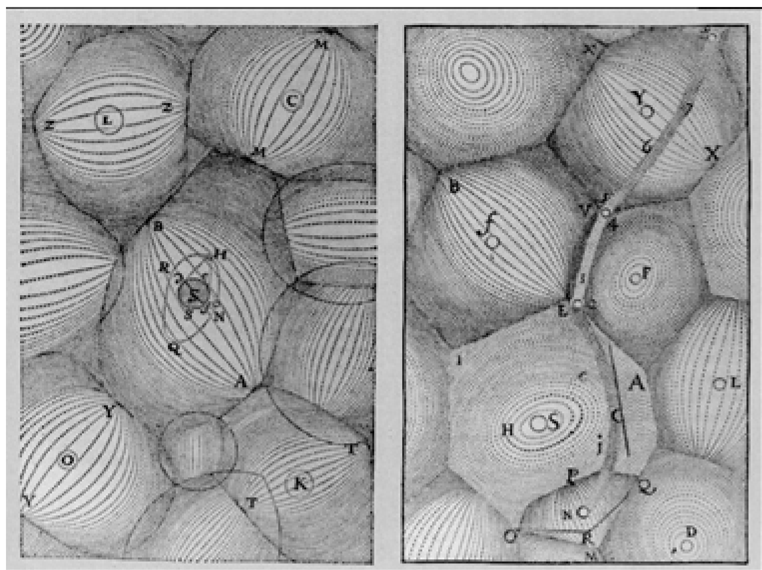


图5.35　笛卡尔的漩涡学说和彗星形成理论。

上左：宇宙中有无数的漩涡，每颗恒星就是一个漩涡中心。漩涡可能会塌缩，恒星就可能窜入临近的漩涡。上右：恒星N窜入太阳系漩涡并继续前行的路径，这就是彗星的形成。所以按照笛卡尔，所有的彗星是一次性的，哈雷的成功预言将彻底否定笛卡尔的漩涡学说。

笛卡尔对惯性概念的发展作出了重要的贡献，他首先坚持惯性运动必须是直线运动，而在圆或曲线上移动的物体必然受到某种外部原因的制约。他因而提出了圆周运动中的离心倾向，这是从力学上分析圆周运动的第一步。

尤其重要的进步是笛卡尔打破了仍旧禁锢在哥白尼、伽利略和开普勒等人脑袋里的有限宇宙概念，提出了无限宇宙的概念。笛卡尔的宇宙是一个充满物质的空间，这些充满空间的物质的运动形成无数的漩涡。笛卡尔提出，我们太阳系就处于这样一个漩涡中，这个漩涡如此之巨大，以至于整个土星轨道相对于整个漩涡来说只不过是一个点。漩涡的绝大部分区域充满了微小的球，由于彼此之间不断地发生着碰撞，这些小球变成了完美的球体。

每一颗行星都倾向于逃离漩涡中心，但构成漩涡的其他物质的离心倾向所产生的反作用与之抗衡，在这种动力学平衡下，行星的轨道就被确定了。

笛卡尔的漩涡理论是第一个取代中世纪水晶球模型的宇宙学说。虽然开普勒的行星运动理论具有更优越的简单性和数学上的严密性，但是开普勒定律所依据的原理来自毕达哥拉斯和柏拉图的哲学，还夹

杂一些亚里士多德的物理学。这是近代机械论哲学所不能接受的。所以，笛卡尔的漩涡模型一度成为17世纪占主导地位的宇宙学说。笛卡尔主义虽然风行一时，但是尽管笛卡尔主义者能够解释天体当前的状态，却不能预测它们将来如何运行。牛顿定量物理学的预测能力，将及时证明它的不可抗拒性，那时笛卡尔将随着亚里士多德一同载入。

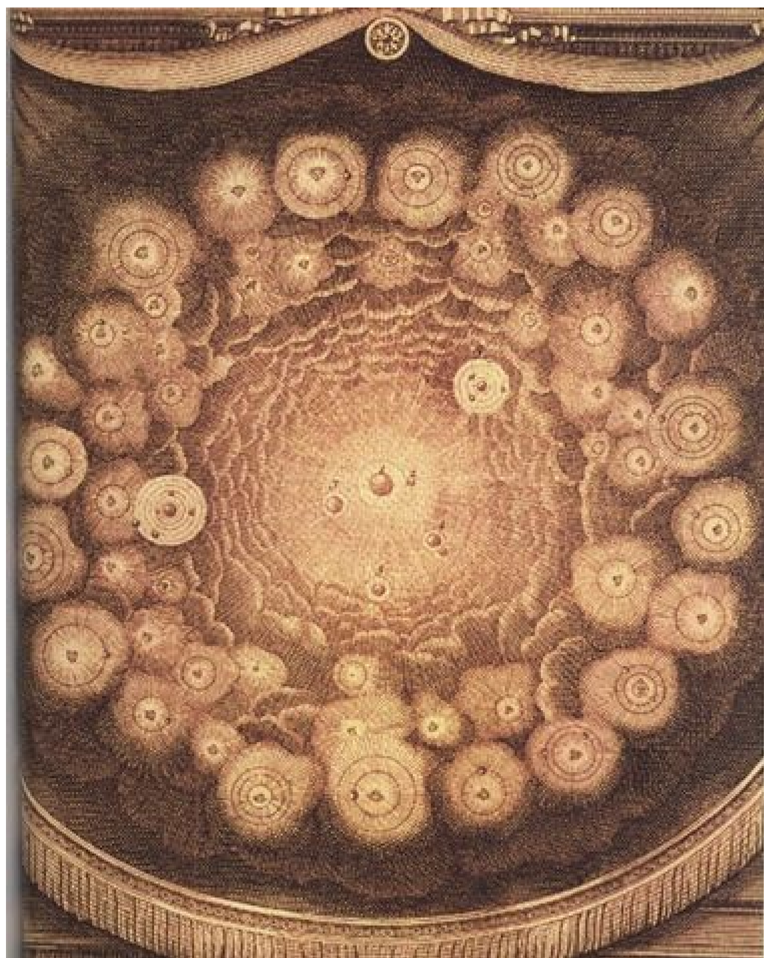


图5.36　在1703年出版的一本书中按照笛卡尔漩涡学说绘制的太阳系图景。

但不管如何，从哥白尼到笛卡尔的一个世纪中，天文学和天文学家研究的宇宙都发生了改变。几十年内，天文学家已经懂得了重复和精确观测的重要性，他们已经发现了如何设计仪器来扩展人类的感官。

第六章 牛顿建立的框架

伽利略的实验和笛卡尔严格表述的惯性定律表明，不是维持一个物体的匀速直线运动而是改变这种运动才需要一个外力。这就意味着，天文学家所需要解释的问题不是行星为什么不断地运动，也不是行星为什么不按严格的圆周轨道运动，而是为什么总是绕太阳作封闭曲线运动，而不作直线运动跑到外部空间去。牛顿对天文学的伟大贡献，正是在对这一问题的思考和回答中作出的。

1.牛顿小传

牛顿12岁时进入当地一所文科中学念书。1656年牛顿第二次结婚的母亲再度成为寡妇，他被召回帮助料理农庄。显然牛顿是一个很蹩脚的农夫，所以又被送回学校。不过他的舅父发现牛顿的学识不凡，极力主张送他到剑桥大学深造。1661年6月牛顿进剑桥三一学院。1665年初毕业，获得文学士学位。

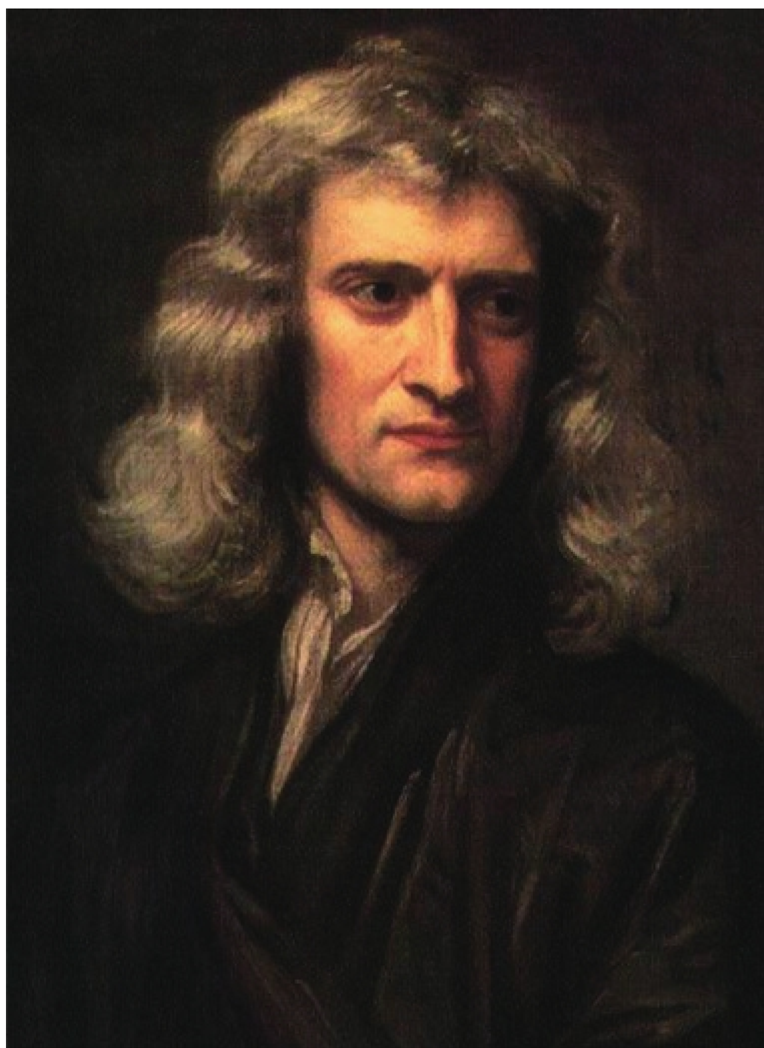


图6.1　1642年的旧历圣诞节（新历为1643年1月4日），伊萨克·牛顿出生于英国林肯郡的一个中农家庭，他是遗腹子，又是早产儿。图为牛顿46岁时的肖像。

1665年到1666年间，为了躲避伦敦的鼠疫，牛顿大部分时间在他母亲的农庄中度过。期间他除了作出一些数学上的发现外，还做了一些关于颜色的实验。一直为人们传诵的牛顿看到一只苹果落到地上从而启发了他发现万有引力定律的著名事件就发生在这个时期。但是由于数学上的一些准备工作还没有做好，当时牛顿没有严格地推导出万有引力的数学表达式。

1667年牛顿回到剑桥之后当选为三一学院的研究员，第二年获得文学硕士学位。1669年27岁的他就任数学卢卡斯教授。在这段时间牛顿恢复了光学研究，并造了第一架反射望远镜，还发现了白光的合成性质。1672年牛顿被选入皇家学会，并向学会报告了他的有关太阳光的分光实验。



图6.2　牛顿手制的反射望远镜，现藏英国皇家学会。

牛顿与他的科学界朋友们的谈话和通信使他的注意力不时回到引力问题上。

1684年8月哈雷造访牛顿，促使牛顿进入对引力问题的紧张研究。并于18个月后写成《自然哲学的数学原理》，简称《原理》。该书在1687年7月出版。

1689年牛顿代表剑桥大学当选为国会议员，1690年国会解散后，牛顿回到剑桥，致力于《圣经》经文的研究和诠释。

1692年，牛顿得了精神崩溃症，休息了将近两年。1695年牛顿被任命为造币厂督办，他兢兢业业地操守这个新的职务。

1699年，在他圆满完成这个任务后，被任命为造币厂厂长，他担任这个职位直到去世。



图6.3　剑桥大学三一学院内的牛顿塑像。

1699年他还当选为法兰西科学院国外院士。1701年，他辞去了三一学院研究员和卢卡斯教授的职位，但还不时研究一些小的科学问题，以及准备《光学》的出版和《原理》的再版。1703年牛顿当选为皇家学会会长，并年年连选连任，直到去世。1705年安妮女王授封牛顿为爵士。

1727年牛顿在主持一次皇家学会的会议时突然得病，两周以后在3月20日去世，享年85岁。



图6.4　威廉·布莱克的画作《牛顿》，画中牛顿被描绘成一位上帝派来的几何学家。

2.万有引力的发现

根据一些可靠的文献资料，“苹果事件”很可能是真实的。牛顿从苹果落地得到启发，想到把苹果拉向地面的力可能和地球控制月亮的力是同一种。为了检验使苹果落地的力和维持月球在其闭合轨道上运动的力之间可能的关系，必须（1）弄清楚究竟根据什么定律，重力随着与地球距离的增加而减少；（2）根据这一定律和所测得的在地球表面上的物体的加速度来计算，月球轨道处的重力加速度将会多大；（3）假设月球的轨道是一个以地球为圆心的圆，计算月球的实际向心加速度是多少；（4）确定由（2）和（3）得出的加速度在数值上是否相等，从而可以认为两者是由于同一种力的作用所引起的。

按照这个思路，牛顿首先通过对匀速圆周运动的分析获得了向心加速度的表达式。如果作匀速圆周运动的物体线速度为v，周期为T，半径为r，向心加速度为a，则有：a＝v2/r；然后利用开普勒第三定律，牛顿也独立得到了引力的平方反比形式：物体下落速度的变化率与该物体距地心距离的平方成反比。

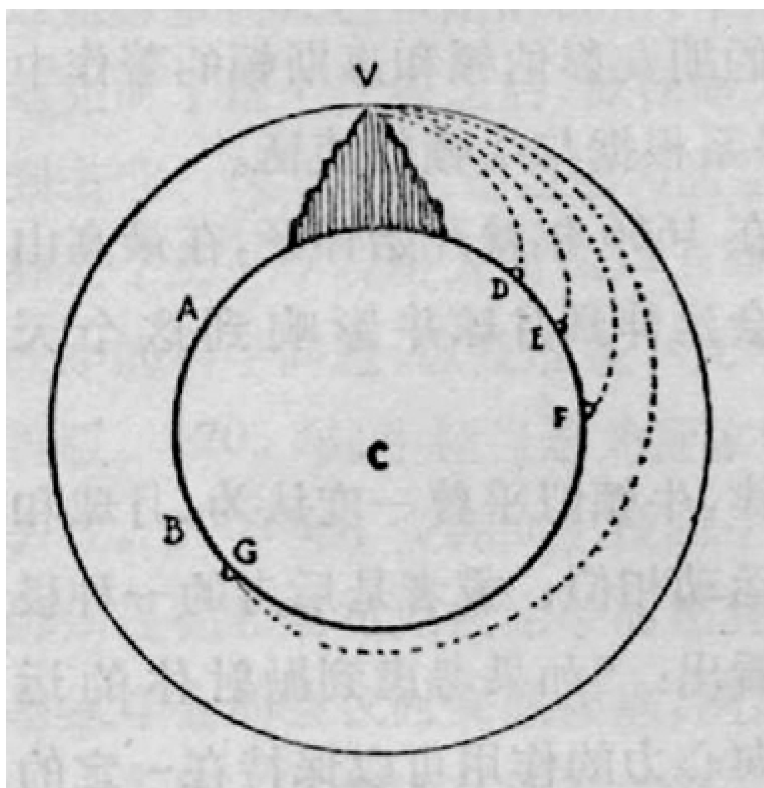


图6.5　根据伽利略的抛射定律，牛顿认为月球和其他行星的轨道运动和抛射体的运动相似，或者说是抛射体运动的一种极限情形：一块被抛射出去的石头由于自身的重量而不得不偏离直线路径，在空中划出一条曲线；最后落到地面。抛射的初速度越大，石块落地之前行经的路程就越远。因此可以设想，随着抛射体初速度的增加，石块落地之前在空中划出的弧长越长，直到最后越出地球的界限，它就可以完全不接触地球而在空中飞翔。

牛顿根据平方反比定律推算出月球距离上的重力加速度。然而该数值与实测结果相差太大，牛顿对此非常失望。一些人认为因为牛顿采用了较小的地球半径数值，所以导致了推算上的差异。也有学者推测牛顿很可能在确定地球和被吸引物体之间的有效距离上遇到了困难。能把地球这个大球体的引力看作只是从地心发出的吗？对这个问题的肯定回答，要等到1685年牛顿创立微积分这个数学工具之后才能作出。

此前的1662年，胡克成为新成立的皇家学会的“实验总监”，他和好友雷恩一起讨论了诸如此类的问题：行星如何在其轨道上运动？彗星又遵循什么路径？地球的磁引力如何随着距离的增加而减小？

1674年胡克在《证明地球运动的尝试》一书中试图对引力的性质做出一些猜测。这些猜测还是相当有道理的，但他始终没有获得正确的引力定律。在书中胡克还认为，引力随着距离的增加而减少。但是引力究竟是与距离本身成反比，还是与距离的平方成反比，或者是别的什么形式？他给不出确切答案。

1680年胡克写信给牛顿，建议他研究确定在一个按平方反比定律变化的引力中心附近区域里运动的质点的运动路径问题。牛顿重新开始了他早年的计算，并推导出在平方反比定律的力的作用下的轨道是一个以吸引体为焦点的椭圆。这样行星的椭圆轨道就得到了一个合理的解释。但牛顿没有回信告诉胡克这个一结果。

1684年1月雷恩和哈雷就平方反比力作用下质点的路径问题展开了一场辩论。

胡克宣称他已经证明了引力的平方反比定律一定能导致椭圆轨道，但他不愿意拿出证明来。雷恩了解胡克爱说大话，于是悬赏征求对这一问题的解答：不管是胡克还是别的什么人，只要他能在两个月之内拿出真实的证据证明这一点，奖金就归他。这笔奖金最终无人认领。

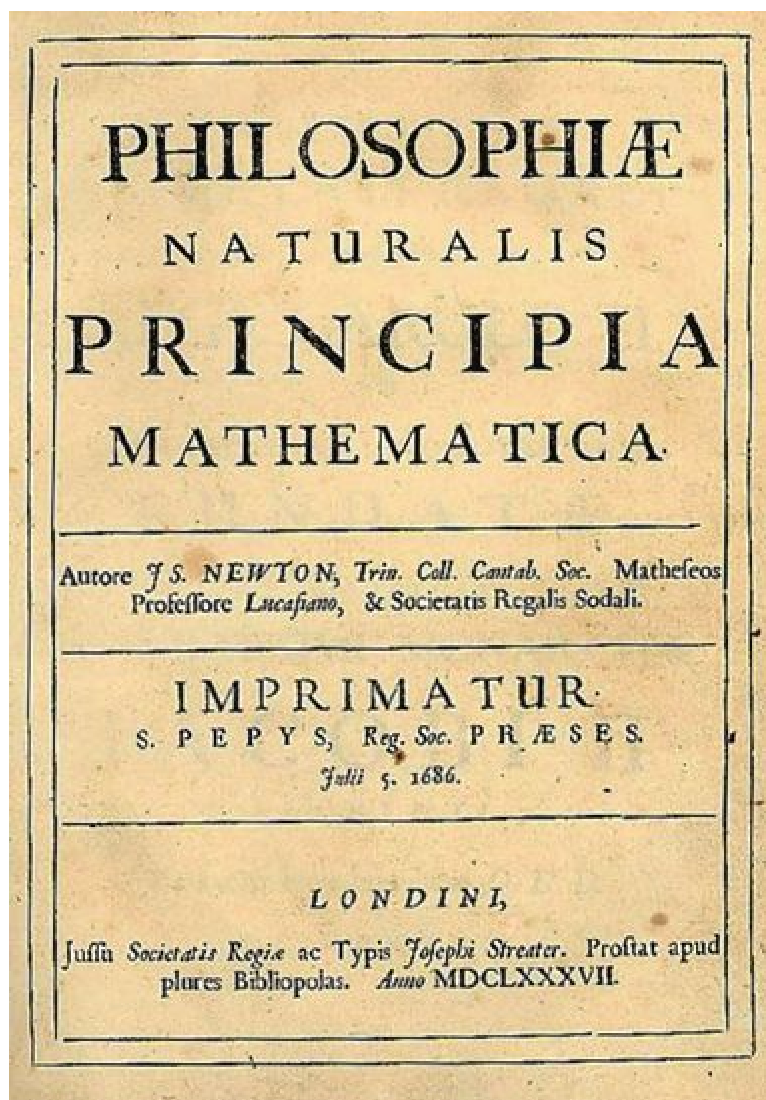
1684年8月哈雷造访牛顿，问他若天体之间在平方反比引力作用下会怎样运动。牛顿回答说按椭圆轨道运动。哈雷想看推导过程，牛顿说手稿丢失了，但答应写出来给哈雷看。哈雷要求牛顿答应把研究成果寄给皇家学会，以便将它们登记备案，确立其优先权。

牛顿的推算很顺利，因为当时已经获得了比较精确的地球半径值，而且牛顿创立的微积分使他能证明：一个所有与球心等距离的点上的密度都相等的球体在吸引一个外部质点时，行同其全部质量都集中在球心。因此牛顿完全有理由把太阳系各天体看作是有质量无体积的质点。

在哈雷收到的牛顿手稿中完成了引力的平方反比定律与开普勒三定律之间的充要证明。开普勒三定律的可信性最终得以确立。在其手稿中，牛顿还表明了开普勒第三定律也适用于伽利略所发现的木星卫星和新发现的土星卫星。这些卫星显然受到了它们所围绕的行星的平方反比引力的作用。如果土星吸引土卫六，它为什么不吸引太阳呢？到几周后牛顿完成了对手稿的修订时，他在认识上实现了关键性的跨越：天体相互吸引。这一认识使他走上了通向万有引力之路，物理学史上翻起了新的一页。

哈雷很清楚牛顿的这些工作的革命性意义，他开始耐心地劝说牛顿出版他的著作。为了详尽地阐述所有这一切，牛顿着手写一本书，18个月后写成。书名叫《自然哲学的数学原理》，简称《原理》。

《原理》初版用拉丁文，于1687年7月问世。《原理》之所以能够出版，哈雷功不可没。起初，皇家学会准备把牛顿的研究成果发表在《哲学学报》上，但在研究了前面几个部分后，便决定出资把这著作印成书本。但是当时皇家学会正处在长期的经济困难中，缺乏足够的资金出这本书，加上胡克宣称对发现拥有优先权，皇家学会因此放弃了原计划。于是哈雷自费承担了该书的出版，他还为牛顿搜集必要的天文资料，校订清样，指出文中的含糊之处，安排印刷和插图等等。



PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore *J S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheseos Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.

S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.

Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu *Societatis Regiæ* ac Typis *Josephi Streater*. Prostat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

图6.6　《自然哲学的数学原理》初版封面。

《原理》共分三篇，以及非常重要的导论。导论中对力学中的各个基本概念作了定义，包括质量、动量、力等。牛顿是第一个精确使用这些概念的人。在这些定义之后的一条附注中，牛顿假设存在绝对的真实的和数学的时间、绝对空间和绝对运动。接着叙述了著名的牛顿运动三定律。

图6．7 牛顿自己使用的第一版《自然哲学的数学原理》。

《原理》第一篇叫做“物体的运动”，在作了必要的数学准备后，着重讨论了在平方反比引力作用下两个质点的运动规律，还完美地解决了一个广延物体的万有引力如何取决于它的形状的问题。

《原理》第二篇是“物体在阻尼介质中的运动”，主要讨论了物体在阻尼介质中的运动规律。并且用一节专门讨论了弹性流体中的波动和波的传播速度，并进一步试图计算声音在空气中的传播速度。

《原理》第三篇名为“宇宙体系（使用数学的论述）”，主要论述了前面两篇给出的力学规律在天文学上的运用。在该篇一开始，牛顿就给出证据证明太阳系中的各天体是按照哥白尼学说和开普勒定律运动，天体的轨道取决于相互之间的引力。牛顿还从理论上推算了地球赤道部分隆起的程度，并指明月球和太阳引力对地球赤道隆起部分的吸引是产生岁差现象的原因。

如果牛顿是对的，彗星受到的是平方反比引力的作用，那么环绕太阳运行的彗星轨道将会是椭圆、抛物线或双曲线。如果是椭圆的话，彗星一定会回归。1695年，哈雷注意到1531、1607和1682年的三颗彗星在轨道上是相似的。在对它们做了进一步的研究之后，哈雷

得出结论说，它们是同一颗彗星在不同时期的再现。

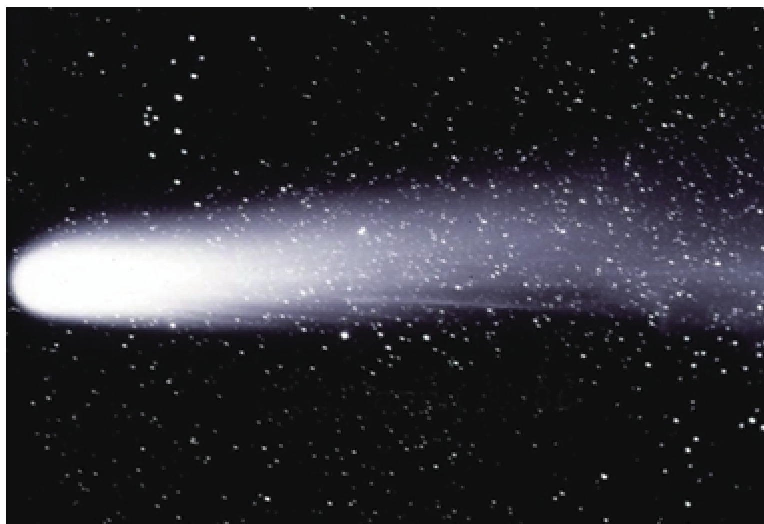


图6.8牛顿力学的验证之一：哈雷彗星的回归，图为1986年哈雷彗星回归时拍摄的照片。

Nodus Ascend.	Inclin. Orbitæ.	Perihelion in Orbe.	Perihelion in Ecliptica	Latitudo Perihelii	Distantia Perihelia à Sole.	Log. dist. Perihelia à Sole.	Tempus Perihelii
gr. ' "	gr. ' "	gr. ' "	gr. ' "	gr. ' "			d
24. 21. 0	32. 11. 0	♉ 7. 59. 0	♉ 12. 45. 15	22. 40. 30 B	40666	9. 609236	Junii
11. 46. 20	5. 20. 0	♉ 15. 33. 30	♉ 15. 40. 20	4. 25. 50 A	54273	9. 734584	Feb.
19. 25. 0	17. 56. 0	♒ 1. 39. 0	♒ 0. 48. 15	17. 3. 05 B	56700	9. 753583	Aug.
20. 27. 0	32. 36. 0	♋ 31. 7. 0	♋ 16. 59. 40	15. 57. 00 B	50910	9. 706803	Oct.
25. 42. 0	32. 6. 30	♑ 6. 50. 0	♑ 11. 6. 00	31. 10. 20 B	46390	9. 666424	Apr.
25. 52. 0	74. 32. 45	♌ 9. 22. 0	♍ 7. 53. 00	69. 35. 20 A	18342	9. 263447	Octo.
18. 57. 20	64. 40. 0	♋ 16. 5. 50	♋ 19. 17. 10	64. 40. 0 B	59628	9. 775450	Nov.
7. 42. 30	6. 4. 0	♈ 8. 51. 0	♈ 8. 50. 10	2. 55. 25 A	109358	0. 038850	Sept.
15. 30. 40	29. 40. 40	♏ 6. 54. 30	♏ 2. 55. 50	22. 45. 50 A	51661	9. 760882	Jan.
12. 12. 30	55. 12. 0	♏ 18. 16. 0	♏ 22. 44. 35	54. 44. 30 B	51293	9. 710058	Julii
20. 21. 0	17. 2. 0	♒ 2. 16. 0	♒ 1. 29. 40	16. 10. 5 B	58680	9. 768400	Oct.
16. 1. 0	[illegible]. 34. 0	♈ 2. 14. 0	♈ 6. 10. 00	35. 50. 0 A	37975	9. 579498	Oct.
28. 10. 0	79. 28. 0	♈ 28. 18. 40	♊ 10. 41. 35	56. 14. 0 A	84750	9. 928140	Nov.
22. 30. 30	32. 35. 50	♋ 25. 58. 40	♋ 21. 37. 30	17. 17. 0 B	44851	9. 651772	Jan.
21. 14. 0	21. 18. 30	♌ 10. 41. 25	♌ 8. 40. 35	16. 1. 50 A	102575½	0. 011044	Nov.
18. 02. 0	76. 05. 0	♊ 11. 54. 30	♉ 24. 6. 35	23. 8. 0 B	10649	9. 027309	Apr.
27. 30. 30	83. 22. 10	♋ 10. 59. 30	♋ 9. 26. 00	69. 27. 40 B	69739	9. 843476	Feb.
26. 49. 10	79. 03. 15	♌ 17. 37. 5	♋ 16. 21. 05	75. 44. 10 B	28059	9. 448072	Apr.
2. 2. 0	60. 56. 0	♐ 22. 39. 30	♐ 27. 26. 50	8. 11. 10 A	00612½	7. 787106	Dec.
21. 16. 30	17. 56. 0	♒ 2. 52. 45	♒ 2. 0. 30	16. 59. 20 B	58328	9. 765877	Sept.
23. 23. 0	83. 11. 0	♊ 25. 29. 30	♋ 10. 36. 55	82. 52. 00 B	56020	9. 748343	Julii
28. 15. 0	65. 48. 40	♏ 28. 52. 0	♐ 15. 55. 25	26. 35. 20 A	96015	9. 982339	Maii
20. 34. 40	31. 21. 40	♊ 17. 00. 30	♊ 16. 24. 00	31. 17. 35 B	32500	9. 511883	Sept.
27. 47. 15	11. 46. 0	♑ 00. 51. 15	♑ 0. 47. 20	0. 38. 10 A	69129	9. 839660	Oct.

图6.91705年哈雷给出的24颗彗星的轨道数据表，有下划线的是哈雷彗星三次回归的数据。

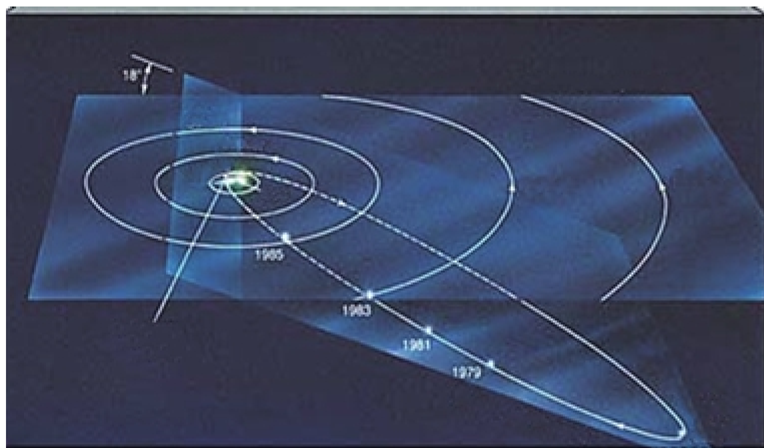


图6.10　哈雷彗星的椭圆轨道示意图

问题在于，这颗彗星每次出现的时间间隔虽然相近，但并不完全相同。哈雷意识到这是由于它在运行中，受到了一颗或多颗行星的引力作用，因而轨道受到了摄动。考虑了这些摄动因素，通过计算，哈雷预测这颗彗星将于“1758年再度归来”。

哈雷在其预测中考虑到了彗星在接近其1682年绕太阳运行的路段时所受到的木星的引力，但是他没有把彗星离开太阳系时木星的引力所起的相反作用计算在内。要对此做出修正，需要进行细致而艰苦的计算。1757年6月，法国天文学家克莱洛在两个助手的帮助之下在巴黎开始了此项工作。他们推算出：该彗星将于1759年4月中旬过近日点，误差允许为一个月。

回归的彗星于1758年圣诞节首先被居住在德勒斯登附近的一位农民看到，第一位看到它的专业人员则是巴黎的彗星猎手梅西叶，比那位农民晚了4个星期。1759年3月13日，彗星经过近日点。这颗彗星的轨道特征与1531、1607和1682年彗星十分相似，它们是同一颗彗星：哈雷被证明是正确的，牛顿主义在公众中赢得了最广泛的胜利。

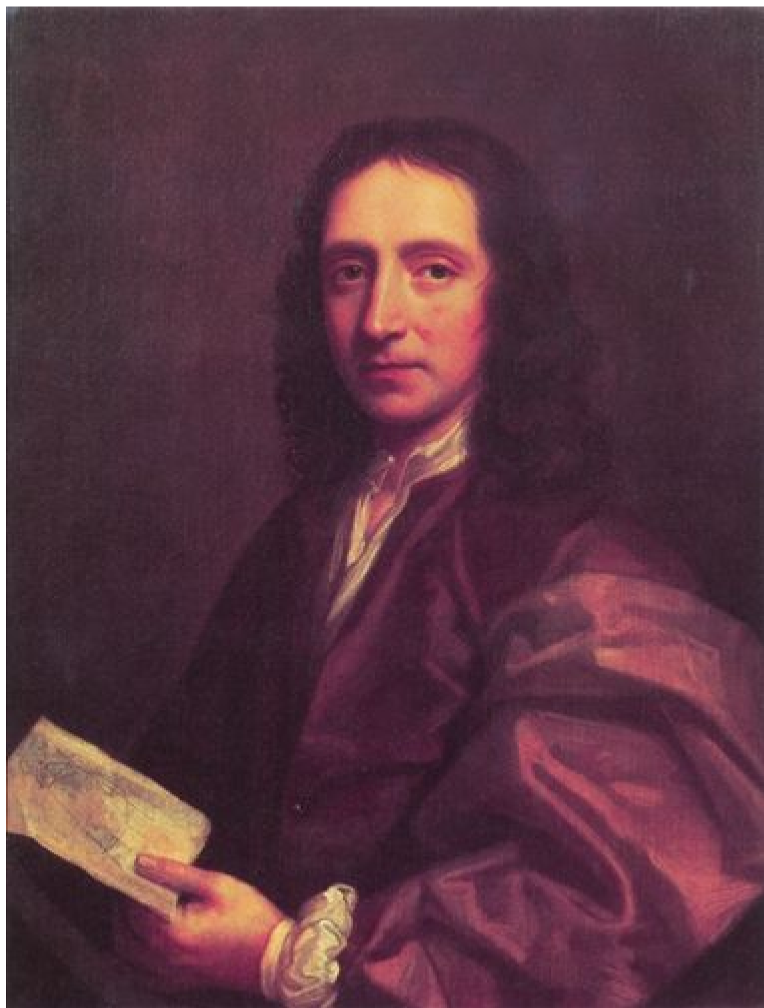


图6.11哈雷肖像。

3.牛顿力学的改造

牛顿在《原理》中使用的是欧几里得《几何原本》中的几何学语言，现今大学课堂上学到的牛顿力学的代数形式是由一些数学家和天文学家在将牛顿力学应用于天体运动时所发展起来的。牛顿力学的这项改造工作主要由法国的克莱洛、达朗贝尔、拉格朗日、拉普拉斯、泊松、柯西、瑞士的欧拉和德国的高斯等人完成。

拉格朗日于1788年出版了他的巨著《分析力学》，全书采用纯代数的方法，没有一幅几何插图。在书里拉格朗日发展了牛顿的摄动理论，研究了两个大质量的天体外加一个小质量的天体即三体问题的轨道稳定性问题。

拉格朗日还研究了太阳系的长期稳定性问题。当时的两项天文观测结果让人们为太阳系的稳定性担忧：一是木星的加速和土星的减速现象，这一现象从第谷时代已为人所熟知；另一个是哈雷提出的月亮从古代起就一直存在着的明显加速现象。

这意味着，如果它们继续这样发展下去，木星就会沿螺线进入太阳，土星会逐渐离开太阳，而月亮则会落入地球，太阳系将会发生巨变乃至瓦解。

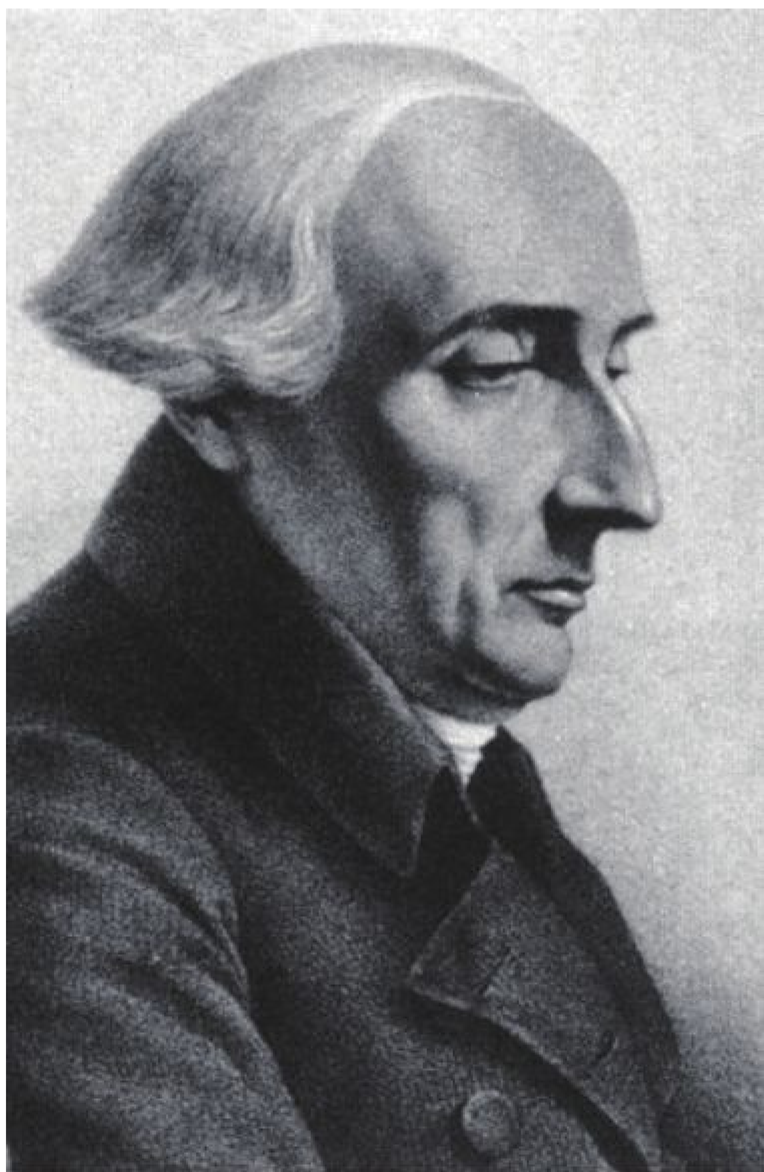


图6.12　拉格朗日，出生于意大利，在柏林工作了一段时间，于1787年被路易十六召到巴黎。

1774年，拉格朗日证明，在一级近似下，行星的轨道倾角和交点连线空间指向呈现周期性的振荡，周期长达几千年。一读到拉格朗日的证明，拉普拉斯立即用同样的方式分析了行星轨道其他方面的一些问题。

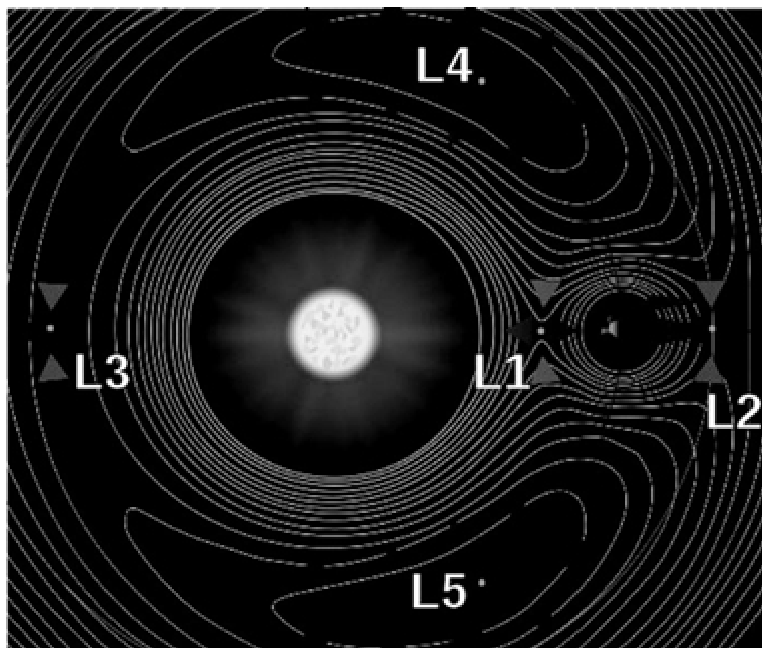


图6.13拉格朗日点。拉格朗日提出在两个大质量天体的引力共振下，存在五个特殊的稳定点，其中三个点L1、L2、L3在两个主天体的联线上，另两个点L4和L5位于以两个主天体的联线为底边在两侧所作的两个等边三角形的顶点处。这五个点被称作“拉格朗日点”。



图6.14　拉普拉斯的早年生活人们所知甚少。他18岁时被送到巴黎，带着将他介绍给达朗贝尔的信，但这位大数学家却拒绝见他。拉普拉斯就寄了一篇力学论文给达朗贝尔。这篇论文如此出色，以致达朗贝尔突然高兴做拉普拉斯的教父。

1785年，拉普拉斯发现了导致木星做长期加速运动和土星的减速运动的原因：该变化并非像欧拉曾经以为的那样是单向的，而是周期性的，其周期约为900年。

它依赖于两个相互作用的天体（木星和土星）与太阳之间的位置关系。1787年拉普拉斯找到了月亮长期加速运动的原因。这是一个二级效应，起因于地球椭圆轨道偏心率的缓慢变小，这使得太阳对月亮

的作用有所减小。在地球轨道的长周期变化中，当偏心率停止减小并开始转向增加时，这一加速效应就会发生逆转。

THE

SYSTEM OF THE WORLD.

BY

P. S. LAPLACE,

MEMBER OF THE NATIONAL INSTITUTE OF FRANCE.

TRANSLATED FROM THE FRENCH

BY

J. POND, F.R.S.

IN TWO VOLUMES.

VOL. I.

LONDON:

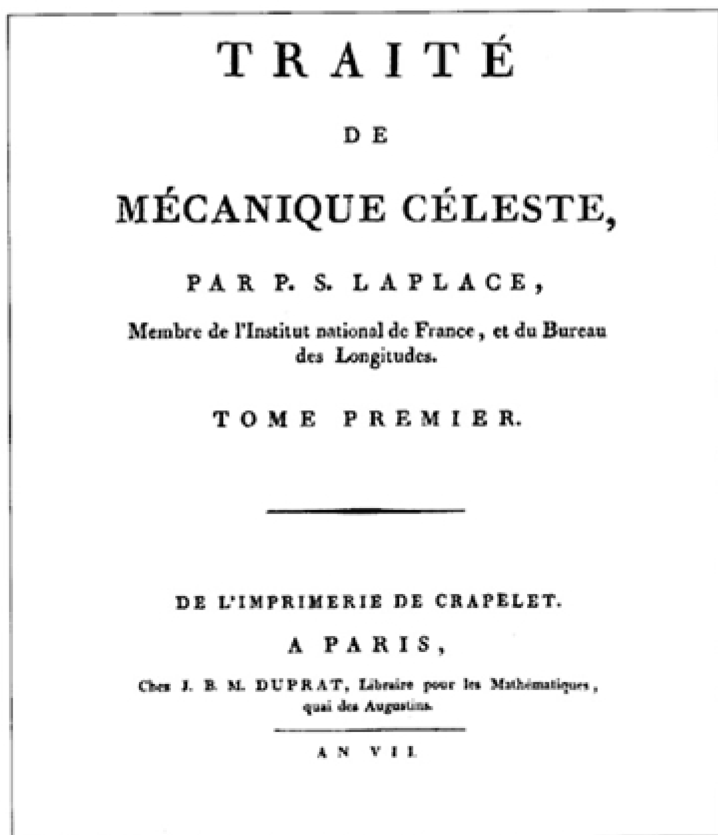
PRINTED FOR RICHARD PHILLIPS, BRIDGE STREET,
BLACKFRIARS.

1809.

W. Flint, Printer, Old Bailey.

图6.15　《宇宙体系论》1809年英译本封面。

1796年拉普拉斯出版了他的《宇宙体系论》，在书中向读者通俗地描绘了这样一幅太阳系图景：其内部的行星运动和几何参数在它们的平均值附近发生小幅度的长周期变化。拉普拉斯相信他已经证明了太阳系是一个稳定的、可自我调节的系统，在这方面它与生物界显然存在的自我调节是类似的。



TRAITÉ

DE

MÉCANIQUE CÉLESTE,

PAR P. S. LAPLACE,

Membre de l'Institut national de France, et du Bureau des Longitudes.

TOME PREMIER.

DE L'IMPRIMERIE DE CRAPELET.

A PARIS,

Chez J. B. M. DUPRAT, Libraire pour les Mathématiques, quai des Augustins.

AN VII

图6.16　拉普拉斯《天体力学》封面。

在《宇宙体系论》的一则附录中，拉普拉斯提出了太阳系起源于一团星云的假说。他猜测太阳系开始是一团巨大的旋转着的星云，随着星云中无数粒子的相互吸引，行星及其卫星从中凝聚了出来。该假说可以说明所有行星和当时已知的卫星轨道的共向性和共面性。这是一项他本人也不怎么重视的猜测，却为他赢得不少名声。

如果说《宇宙体系论》是一本为普通公众所写的不需要数学知识的天文普及读物，那么拉普拉斯的《天体力学》则是一部让普通读者望而生畏的数理天文学巨著。《天体力学》从1799年到1825年间陆续出版，共五大卷16册。

拉普拉斯在《天体力学》中两次对太阳系的稳定性作了详细的数学论证。书中拉普拉斯高超的数学分析技巧展露无遗。据说在书中拉普拉斯常用的一句口头禅是：从方程A“显而易见”可以得到方程B，而为了弄清这“显而易见”，别人要花上几小时甚至几天的工夫。传说拿

破仑翻遍了《天体力学》全书，把拉普拉斯叫去，问他为什么这本讲述造物主所创造的世界的书中从来不提造物主的名字。拉普拉斯回答说：“陛下，我不需要这个假设！”

拉格朗日听到这话后说：“啊！可是它同样也是个美妙的假设呢，它解释了多少事情啊！”

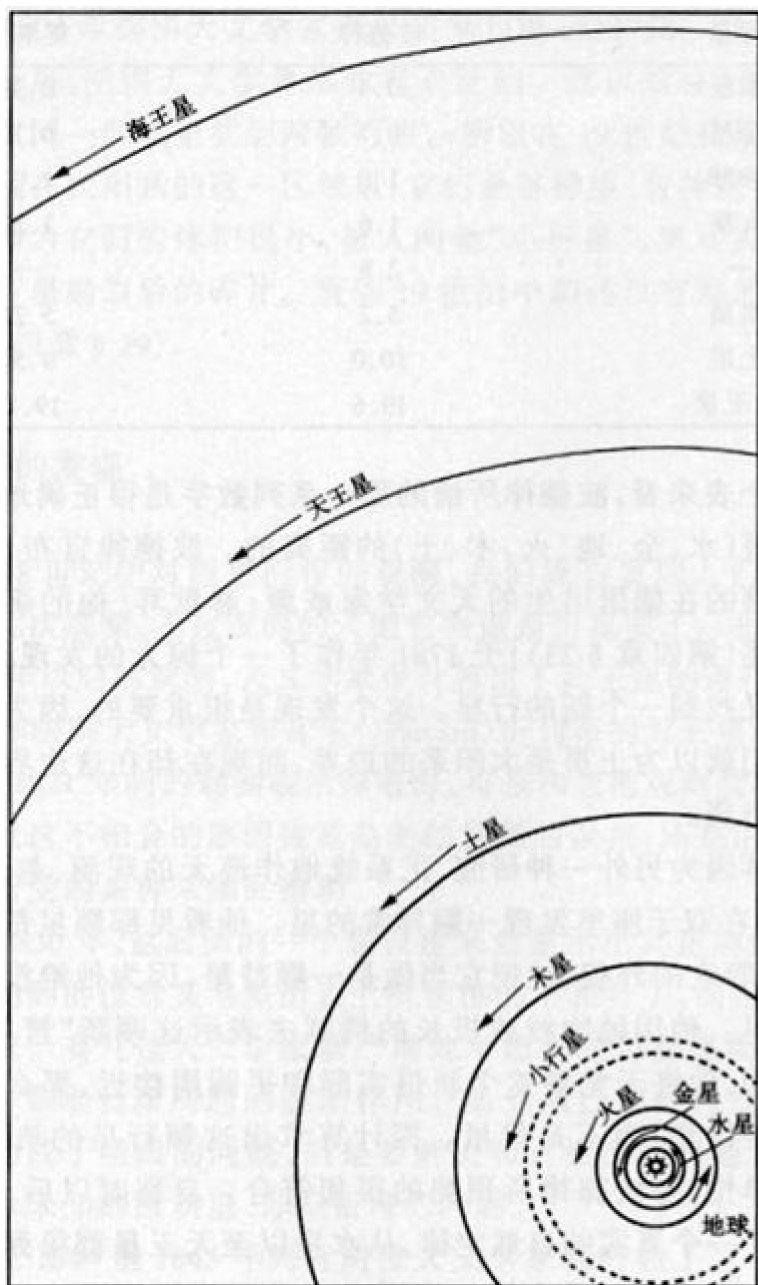


图6.17　火星-木星间隙。

4.“丢失”的行星

在太阳系中，各行星之间的间距逐渐增大，但火星和木星之间有一个不成比例的巨大间隙。开普勒一度为此感到困惑，他想到在这个巨大的空间带上可能存在未被发现的行星。牛顿认为由于木星和土星这两颗巨大行星的引力使太阳系面临崩溃的危险，为了消除这一危险，上帝把它们驱逐到了太阳系的外围，所以出现了火星和木星之间的空隙。兰伯特认为木星和土星有可能“夺走”了曾一度占据在该空间带上的行星。英国一位天文爱好者赖特则怀疑在该间隙上曾有过一颗行星，而该行星后来受到彗星的撞击毁掉了。

牛津大学教授戴维·格里高利在其1702年的《天文学原理》一书中特别提到，行星轨道半径大致与数字4、7、10、15、52、95成比例。维登堡大学的物理学教授提丢斯注意到了这串数字，并把格里高利的15换成16，95换成100，从而使得那些数字分别等于4、4＋3、4＋6、4＋12、4＋48和4＋96。没有行星与4＋24对应。

行星	Titius	Bode		平均距离
水星	4	397	397	397
金星	$4+3\times2^0=7$	$397+293\times2^0$	680	723
地球	$4+3\times2^1=10$	$397+293\times2^1$	973	1000
火星	$4+3\times2^2=16$	$397+293\times2^2$	1559	1524
?	$4+3\times2^3=28$	$397+293\times2^3$	2731	–
木星	$4+3\times2^4=52$	$397+293\times2^4$	5075	5203
土星	$4+3\times2^5=100$	$397+293\times2^5$	9763	9541
天王星	$4+3\times2^6=196$	$397+293\times2^6$	19139	19082

表6.1 提丢斯 - 波得定则

1772年德国天文学家波得也注意到了这个数列，并深感兴趣，他开始相信在火星-木星间隙带上存在着一颗未曾发现的行星，该行星与太阳的距离约为4＋24单位。



图6.18　西西里岛巴勒莫的皮亚齐，他的天文台位于欧洲最南端，他不知道自己已经被选定成为一位“天空警察”。

1781年3月威廉·赫歇尔发现天王星。

天王星的距离正好落在4＋192＝196个单位上。新行星的发现大大激起了寻找“火星-木星间隙”行星的热潮。后来波得取日地距离为1000单位，这样水星到太阳的距离为397单位，水星与金星之间的间距为293单位，并以此改写了提丢斯定则。

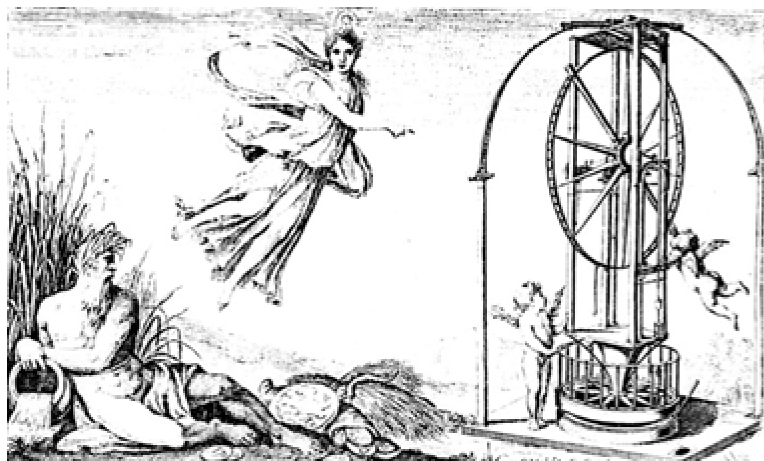


图6.19　皮亚齐立志编制一份精确的恒星星表，精度要远高于前代同类工作，为此他委托伦敦的著名仪器制造商拉姆斯登设计制造了一架巧妙精致的仪器。

天王星轨道半径完全符合前述数列。

德国天文学家察奇对此数列完全信服了。

1787年他对火星-木星间隙带做了搜索，试图在那里找到一颗行星，结果一无所获。1799年察奇与德国同行们商量希望能组织起来对该问题进行联合探索。1800年9月21日察奇和其他几位天文学家决定组成一支包括24名“天空警察”在内的观测队，每人负责黄道带上的一个区域，搜寻新天体。

1801年元旦，皮亚齐像往常一样继续为他的星表而工作。他测量了拉卡伊黄道恒星表中编号为87的那颗恒星的位置，并利用这一机会测量了其前的那颗八等星。

第二天晚上他再次对那颗八等星做了测量。让他吃惊的是，他发现这颗星好像移动了。在随后的几天里，他对该星的继续观测证明，它确实移动了。因此，它是太阳系的一员，不是恒星。

皮亚齐很快就确定这是一颗新的行星，并把这颗星叫做谷神星，以此表示对西西里的保护女神谷神的敬意。德国数学家高斯使用他新发明的“最小二乘法”计算出了这颗新行星的轨道，确定它到太阳的平均距离2.77天文单位，与提丢斯的2.8和波得的2.731非常接近。

Beobachtungen des zu Palermo d. 1 Jan. 1801 von Prof. Piazzi neu entdeckten Gestirns.

1801	Mittlere Sonnen-Zeit	Gerade Aufsteig. in Zeit	Gerade Aufsteigung in Graden	Nördl. Abweich.	Geocentrische Länge	Geocentr. Breite	Ort der Sonne + 20" Aberration	Logar. d. Distanz ⊙ ♁
	St. ′ ″	St. ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	Z. ° ′ ″	° ′ ″	Z. ° ′ ″	
Jan. 1	8 43 27.8	3 27 11.25	51 47 48.8	15 37 43.5	1 23 22 58.3	3 6 42.1	9 11 1 30.9	9.9926156
2	8 39 4.6	3 26 53.85	51 43 27.8	15 41 5.5	1 23 19 44.3	3 2 24.9	9 12 2 28.6	9.9926317
3	8 34 53.3	3 26 38.4	51 39 36.0	15 44 31.6	1 23 16 58.6	2 58 9.9	9 13 3 26.6	9.9926324
4	8 30 42.1	3 26 23.15	51 35 47.3	15 47 57.6	1 23 14 35.5	2 53 55.6	9 14 4 24.9	9.9926418
10	8 6 15.8	3 25 32.11	51 23 1.5	16 10 32.0	1 23 7 59.1	2 29 0.6	9 20 10 17.5	9.9927641
11	8 2 17.5	3 25 29.73	51 22 26.6	....	....	......	....	......
13	7 54 26.1	3 25 30.30	51 22 34.5	16 22 49.5	1 23 10 27.6	2 16 59.7	9 23 12 13.5	9.9928490
14	7 50 31.7	3 25 31.72	51 22 55.8	16 27 5.7	1 23 12 1.2	2 12 56.7	9 24 14 15.5	9.9928809
17	......	......	......	16 40 13.0	....	......	....	......
18	7 35 13.3	3 25 55.[illegible]	51 28 45.0	....	....	......	....	......
19	7 31 28.5	3 26 8.15	51 32 2.3	16 49 16.1	1 23 25 59.2	1 53 38.2	9 29 19 53.8	9.9930607
21	7 24 2.7	3 26 34.27	51 38 34.1	16 58 35.9	1 23 34 21.3	1 45 6.0	10 1 20 40.3	9.9931434
22	7 20 21.7	3 26 49.42	51 42 21.3	17 3 18.5	1 23 39 1.8	1 42 28.1	10 2 21 33.0	9.9931886
23	7 16 42.5	3 27 6.90	51 46 43.5	17 8 5.5	1 23 44 15.7	1 38 52.1	10 3 22 22.7	9.9932348
28	6 58 51.3	3 28 34.37	52 13 38.3	17 32 54.1	1 24 15 15.7	1 21 6.9	10 8 26 30.1	9.9935061
30	6 51 52.9	3 29 43.14	52 27 2.1	17 42 11.0	1 24 30 9.6	1 14 16.0	10 10 27 46.3	9.9936332
31	6 48 26.4	3 30 17.25	52 34 18.8	17 48 21.5	1 24 38 7.3	1 10 54.6	10 11 28 28.5	9.9937007
Febr. 1	6 44 59.9	3 30 47.[illegible]	52 41 48.0	17 53 36.3	1 24 46 19.3	1 7 30.9	10 12 29 9.6	9.9937702
2	6 41 35.5	3 31 19.06	52 49 45.9	17 58 57.5	1 24 54 57.9	1 4 17.5	10 13 29 49.9	9.9938423
5	6 31 31.5	3 33 2.70	53 15 40.5	18 15 1.0	1 25 22 43.4	0 54 21.9	10 16 31 45.3	9.9940751
8	6 21 39.2	3 34 55.50	53 44 27.5	18 31 23.2	1 25 53 29.5	0 45 5.0	10 19 32 35.3	9.9943276
11	6 11 58.3	3 37 6.54	54 16 38.1	18 47 58.8	1 26 26 40.0	0 36 2.9	10 22 33 11.4	9.9945823

图6.20　1801年9月皮亚齐在MonatlicheCorrespondenz上发表的观测结果。

一开始人们认为谷神星就像天王星一样毫无疑问是颗大行星。但威廉·赫歇尔却惊讶地发现，即使用他的高倍望远镜也很难看到它的行星光斑。他觉得这颗星甚至比我们的月球还要小。实际上，谷神星直径仅为1003千米，而月亮直径为3476千米。更糟糕的是，到了3月德国天文学家奥伯斯发现了另一个移动着的天体，他把它叫做智神星。赫歇尔对智神星的直径也做了测量，认为它小于111英里。显然，谷神星和智神星没有资格叫做行星。

为了用合适的术语对新发现的这类天体加以描述，赫歇尔提议把它们叫做小行星。为了挽救那个数列，奥伯斯猜测说这两颗小行星是曾经占据在该间隙的那颗大行星的碎片。

那么应该还有别的碎片。果然，1804年德国天文学家哈丁发现了婚神星，1807年奥伯斯又发现了灶神星。灶神星发现之后很长一段时间里人们没有再找到新的小行星，天文学家们很快就厌倦了这种搜寻。后来德国一位退休邮政局长亨克唤起了人们对搜寻小行星的兴趣。亨克于1830年开始搜寻，默默工作了15年，于1845年发现了第五颗小行星义神星，1847年又发现了第六颗小行星韶神星。到1891年，总共找到了300多颗小行星。能够发现这么多小行星，主要得益于照相术的应用。

如果小行星真的是一颗行星爆炸所形成的碎片的话，那么（至少在一开始）它们的轨道应该交汇于爆炸处及在太阳的对侧处。但是随着越来越多的小行星被发现，人们认识到实际情况远非如此。事实上现在人们知道，只有很少一部分小行星直径超过250千米，所有小行星的质量加起来也远不及月球，更不要说与行星相比了。小行星的成

因至今仍是个谜。

5.算出来的行星

赫歇尔和皮亚齐的目光其实不在太阳系内的天体上，他们关心的是遥远的恒星。天王星和谷神星只是他们在研究恒星的过程中很偶然地发现的。但到了19世纪中叶，海王星的发现却完全不同。这一次天文学家们是蓄意在满天繁星中把它找出来的。天文数学家们仅仅依靠他们手中的笔和纸以及牛顿力学的知识，就知道了它在哪里。

在天王星于1781年被发现后不久，波得就发现迈耶尔在1756年曾记载过该星的位置，而弗拉姆斯提德更是早在1690年就记述了它，不过他们都把它当成了一颗恒星。这些资料使得天文学家们能够确定其椭圆轨道的根数，计算出它未来的位置表来。

可是，天王星不久就开始偏离其预期轨道。到1790年，达朗贝尔公布了他重新编算的天王星历表，该表看上去与观测结果吻合得相当好，这使问题暂时得到了解决。但是到了19世纪20、30年代，天王星的实测位置与历表位置之间再次出现偏差。

面对新的麻烦，各种各样的解释如雨后春笋般涌现了出来，在这些解释中，有两种值得认真考虑：也许引力定律在大距离情况下会偏离平方反比形式？或者天王星受到了其外围尚未被发现的一颗行星的吸引？



图6.21 剑桥大学天文学家约翰·亚当斯。

在18世纪中叶，人们一次又一次试图修改引力定律，但无论如何努力，该定律总是坚如磐石。这样，人们产生了一种共识：天王星的反常行为是受到一颗未被发现的行星的作用的结果。

从已知的行星去计算它施加的摄动已经是天体力学的经典问题，但是反过来要从摄动效果去求解摄动行星的位置和大小，却还是难题。一位年轻的剑桥大学毕业生亚当斯选择了这个难题。1843年10月他求得了未知行星的大致位置。由于教学工作繁忙，直到1845年9月他才得出更精确的结果。他推算的该行星在1845年10月1日的日心黄经为323°34′。

剑桥大学的天文学教授查理斯给亚当斯写了一封推荐信，亚当斯手持推荐信去找当时的皇家天文学家艾里，希望向他呈上自己的分析。但是亚当斯未能同艾里交谈，只是给艾里留下了自己论文的摘要。



图6.22　勒威耶毕业于巴黎综合工科学校，并在该校获得一个天文学教职。

他沉浸于法国“天体力学”的巨大传统之中，首先在太阳系的稳定性方面拓展了拉普拉斯的工作，然后又研究水星轨道。1845年他受巴黎天文台台长阿拉果的邀请，开始探讨天王星为什么会偏离其正常轨道这一问题。

法国的勒威耶于1845年11月向巴黎科学院提交了一篇关于未知行星摄动天王星的论文。论文的复制本很快送到了艾里手中。1846年6月勒威耶又提交了第二篇论文。他在论文中提出那颗未被发现的行星就在波得定则所预言的距离上，并给出了它的位置在日心黄经325°左右。

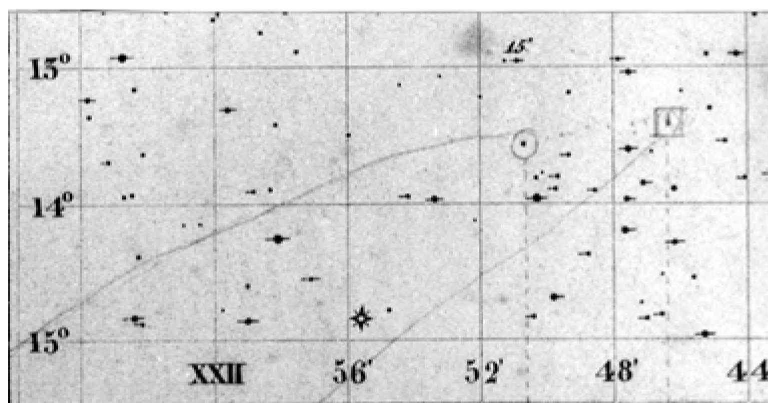
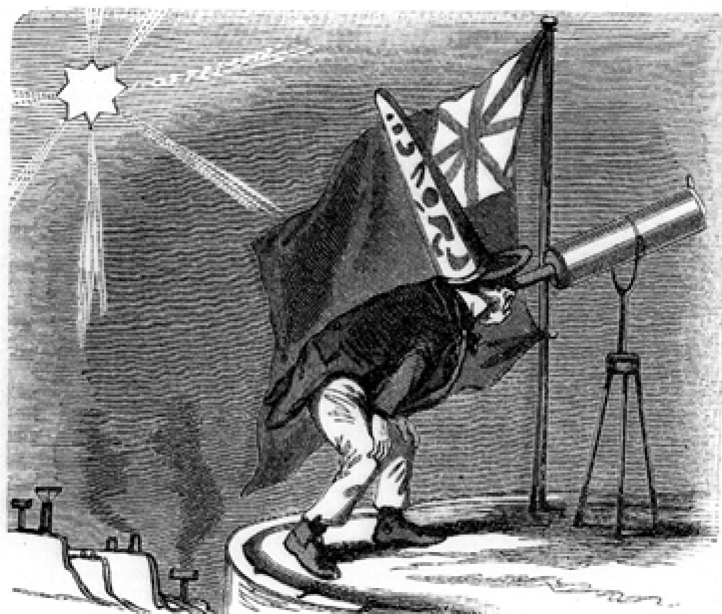
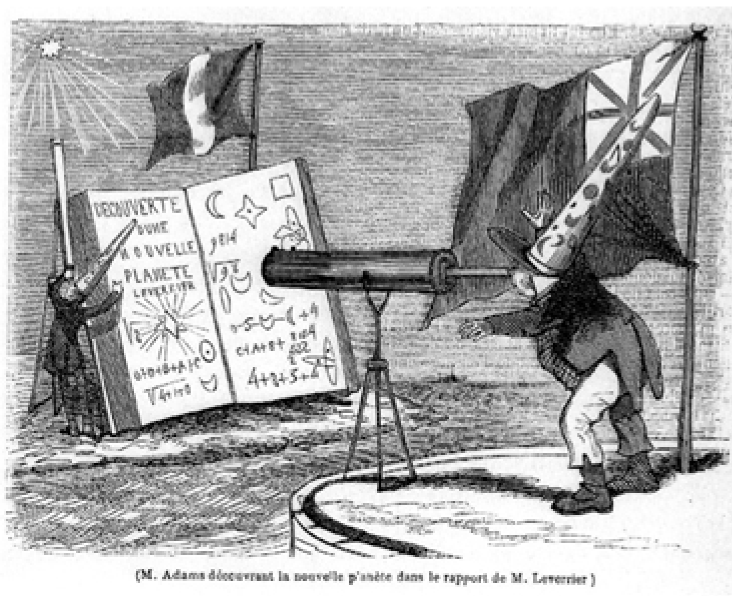


图6.23　发现海王星时所用的星图。

视场里有一颗星（圆圈内）不在星图上，方框内黑点是预言位置。1846年9月23日晚，伽勒和他的学生达勒斯特开始搜寻勒威耶预言的那颗行星。搜寻一阵之后，加勒一无所获，这时达勒斯特提议将该天区与星图加以比较。在一个抽屉里，他们找到了柏林科学院编制的最新星图。该星图尚未向国外发行。



(M. Adams cherchant la planète de M. Leverrier.)



(M. Adams découvrant la nouvelle planète dans le rapport de M. Leverrier)

图6.24讽刺漫画之一：亚当斯在错误的方向上搜寻勒威耶行星。勒威耶的成功使英国的天文学家们产生了一种失落感。亚当斯做出了类似的预测，却因缓慢的搜寻步伐以及缺乏该天区最新星图而被耽误了。英国人提议由亚当斯和勒威耶分享这份荣誉，但巴黎人对此冷嘲热讽。讽刺漫画之二：亚当斯在勒威耶的报告中找到了那颗新行星。

艾里看到勒威耶对未知行星位置的预言与亚当斯十分接近，这下他动心了。但他认为搜寻未知行星不是皇家天文台的任务，于是他劝查理斯在剑桥做这件事情。查理斯开始寻找，但他没有该天区精确的星图，只能反复检查该天区近期的天象，看在这段时间内是否有“星”移动。查理斯把这当成一种零活，毫无紧迫感。

1846年9月勒威耶给德国柏林天文台的天文学家伽勒去了一封信，要求他协助寻找未知行星。伽勒9月23日收到信，在当天晚上就在勒维耶预言的位置附近找到一颗新的行星，离开勒维耶预言的位置相差不到1°，行星显示的圆面角直径（2″.3）也与勒维耶的预言（3″.3）相当接近。

伽勒能够在点点繁星中顺利辨认出新行星的一个关键因素是他拥有一份当时世界上最为精密的星图。

勒威耶在寻找海王星上的成功，让他萌生一种野心，试图去解决天文学史上另一个悬而未决的疑案。天文学家长期观测发现，水星绕日轨道的近日点发生着缓慢进动，并精确地确定了其进动速率为每100年进动1°33′20″。发生进动的主要原因是除了太阳的引力外，还

存在其他行星的引力摄动。根据牛顿万有引力定律可以推算出水星轨道近日点的进动速率是每100年1°32′37″，这个数值与观测结果的差为每100年43″。这个残差长期以来无法解释。面对无法解释的残差，勒威耶自然地想到，是否又是一颗未被发现的行星造成了这一差异？

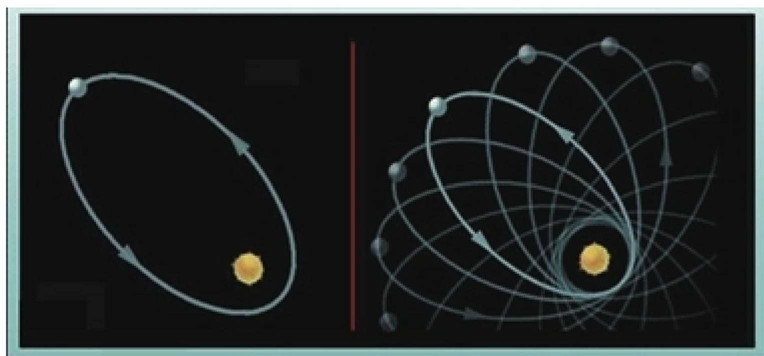


图6.25　水星近日点进动示意图。

1859年9月，他发表了自己的计算结果：一颗与水星大小相仿、距离太阳为水星一半的行星，会使水星产生这种进动残差。巧的是这一年早些时候，法国奥格雷斯镇一位叫做雷卡保尔的医生看到过一个黑点划过太阳表面。到12月他听说了勒威耶的预言后相信他看到了水内行星，于是就把此事写信告诉了勒威耶。勒威耶立即赶到奥格雷斯跟医生会面，还把这颗星起名为祝融星，并计算出其公转周期不到20天。

1876年祝融星预期又要从太阳的圆面上经过，大约20来个观测站对这颗假想的行星做了观测，它们的资料被汇总在了一起。勒威耶认为其中的5个是可信的。在这些观测的基础上，他计算出了该行星有可能于1877年3月和1882年10月再次经过日面，但后来什么也没有找到。

经过20多年辛苦搜寻，到19世纪末，人们相信不存在什么祝融星。水星近日点进动残差不得不被当做天体力学尚未解决的一个谜保留下来，成为牛顿力学无数辉煌的成功事例中一个少见的例外。

直到1916年爱因斯坦用他提出的广义相对论中的空间弯曲和光速变慢效应才最终解释了水星近日点的进动残差。根据广义相对论，把太阳引力场看成是弯曲的空间，行星在此弯曲空间中的运动规律跟平方反比规律得到的结果有所差异，即使没有其他因素影响，行星公转一周，它的近日点也会进动 $24\pi^3a^2 / T^2c^2(1-e^2)$ 弧度，其中a为

轨道半长轴，T为行星公转周期，c为光速，e为轨道偏心率。用水星的数值代入，结果正好是43″！

人们本来期待着水星给牛顿力学带来另一个漂亮的胜利，谁知它最终却成了爱因斯坦的指路明灯，成为广义相对论取代牛顿力学的明证。于是有好事者在亚历山大·波普写给牛顿的赞美诗后面续了两句，变成了这样：

自然和她的规律隐匿在黑暗中，

上帝说：让牛顿去吧，一切便显光明。

但是好景不长，魔鬼吼叫：

让爱因斯坦去吧，一切都恢复原样。

第七章 天体测量的进步

文艺复兴时期天文学家们看到的天空和他们的古代先辈们看到的并无不同。

但所有这一切都将发生改变。从伽利略开始，天文学家比他们的前辈拥有了巨大的优势。望远镜的使用使得他们看到了迄今没有看到过的、不知道的、未被研究过的东西。不过，正如伽利略经常强调的："如果他们看到了我们所看到的，他们也将作出我们所作出的判断。"

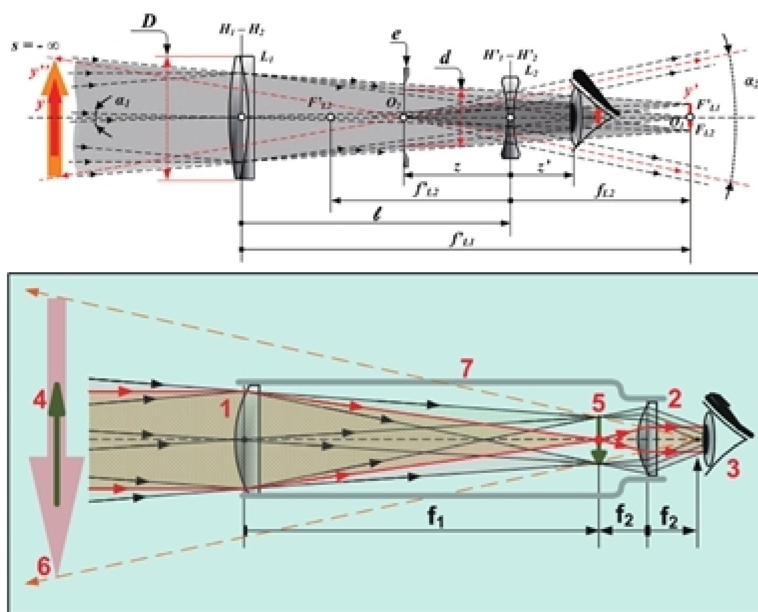


图7.1　伽利略望远镜（上）和开普勒望远镜（下）的不同光路图。

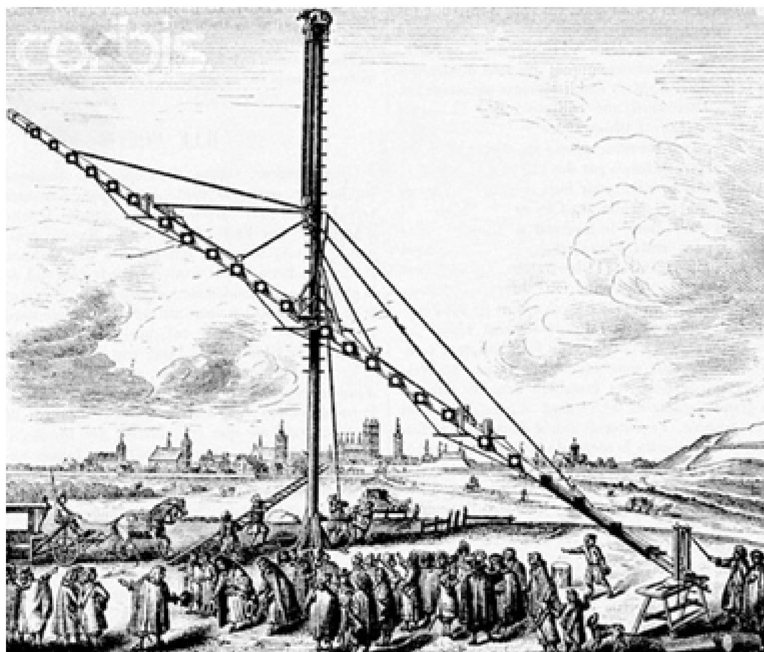


图7.2赫维留斯用过的一架望远镜，焦距长达45米。这架望远镜的整个镜筒吊在一根30米高的桅杆上，需要很多人用绳子来操控它的升降。

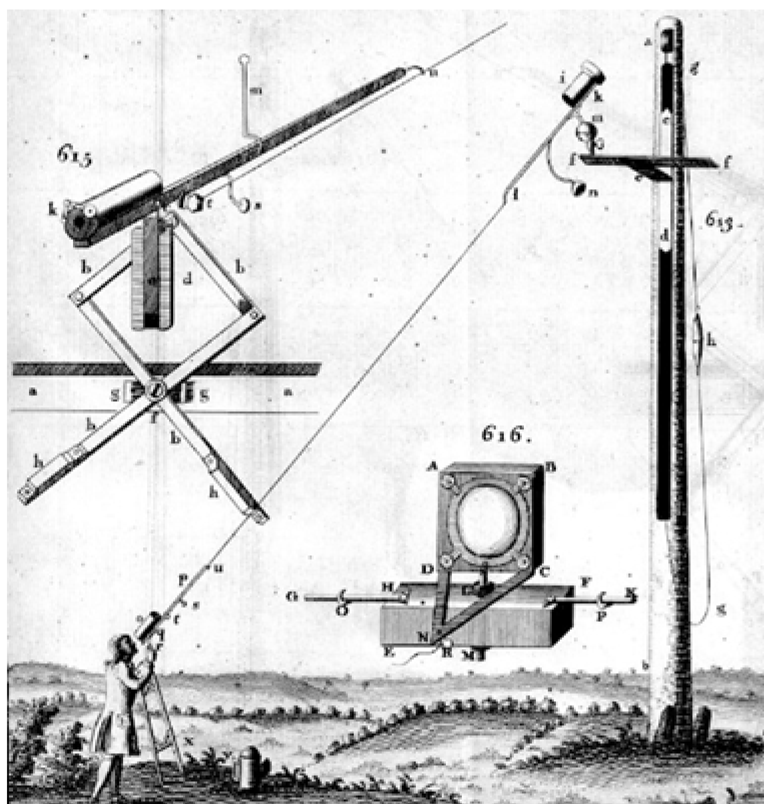


图7.3惠更斯设计的一架目镜和物镜之间只有一根绳子连接的望远镜。这架望远镜的透镜口径只有10多厘米，焦距则长达37米。为了避免镜筒自重造成的弯曲，惠更斯干脆取消了镜筒。他把物镜和目镜各装在一个金属圆筒里，把物镜圆筒安装在高度可调节的高竿上，目镜安置在地面的一个木支架上，用细绳把物镜和目镜连接起来。这样的望远镜要对准一颗星是很困难的。由于没有镜筒，周围的散光也容易进入目镜，使星像变淡。但是为了减少色差，这些似乎是值得付出的代价。

1.望远镜的使用

伽利略设计和制造的望远镜用凸透镜作物镜，用凹透镜作目镜，成正立的像。这种望远镜叫做“伽利略望远镜”。开普勒很快在他的《屈光学》中提出一种设计，目镜也用凸透镜，这种望远镜视场大，成倒像，用于天文观测，叫做“开普勒望远镜”或“天文望远镜”。

早期的折射望远镜存在着一些缺陷。首先当时使用球形曲率的透镜，使平行光不能被聚焦，因此不能形成清晰的像。17世纪研磨和抛光技术无法消除透镜的球面像差。其次，即使透镜能使单色光聚焦，但由于不同颜色的光有不同的折射率，因此不能严格聚焦于一点。这种色差的存在仍旧阻止天文学家获得清晰的像。为了抑制球面像差和色差，只能采用小曲率即长焦距的透镜来制造折射望远镜。

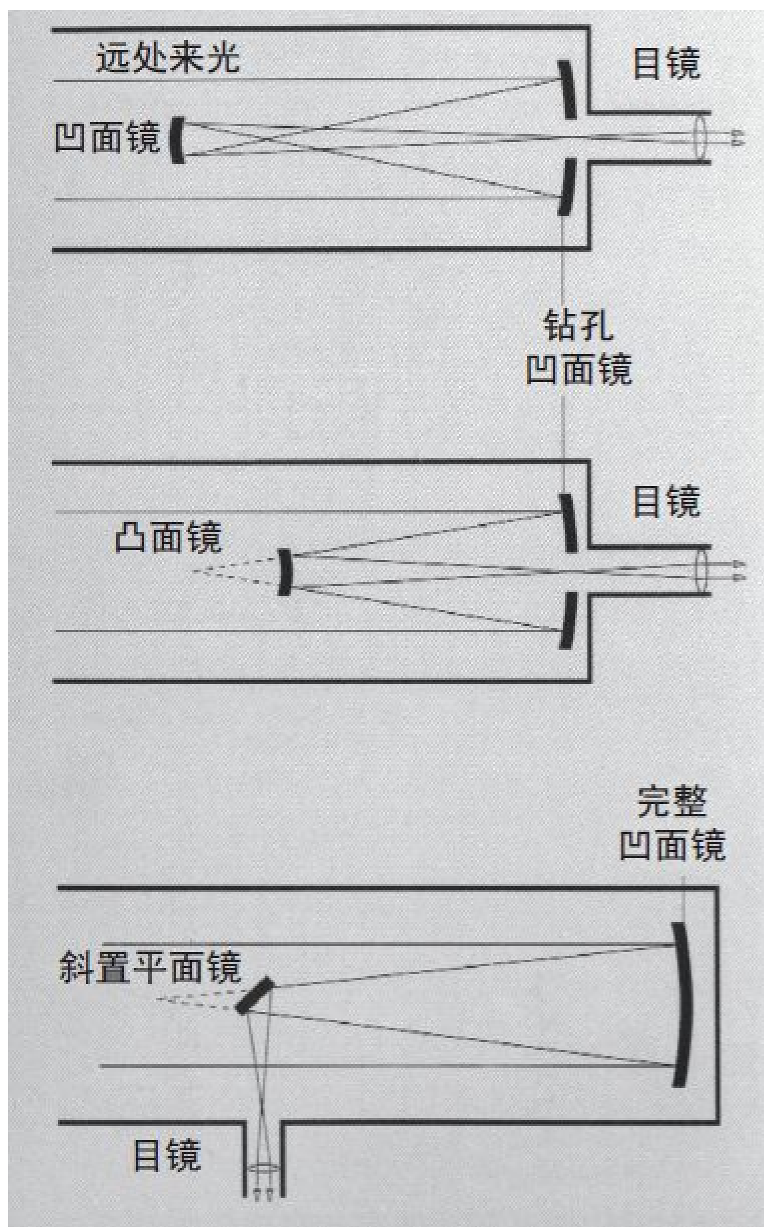


图7.4三种反射望远镜光路的比较。上：格里高利反射望远镜；中：卡塞格林反射望远镜；下：牛顿反射望远镜。

折射式望远镜的诸多困难促使苏格兰数学家格里高利在1663年提出了一种不同的设计。格里高利用凹的抛物面镜为主镜，凹的椭球面

镜为副镜，主镜的中央挖一小孔，导出所成的像。但是当时的工艺水平无法研磨这样的透镜，所以格里高利设计的望远镜并没有真正制成。

牛顿发现了白光的合成性质之后，认为折射望远镜的色差无法消除，于是独立地提出了反射望远镜的设想。1668年他制造了第一架反射望远镜。他用一个凹球面金属镜作为物镜。物镜焦点处安置一块平面反射镜，镜面与光轴成45°角，把光线反射到镜筒一侧安装的目镜，然后成像。

在牛顿的设计中，主镜上不必再穿孔，而第二面镜子则是平面镜。这种形式的反射望远镜成为后来大型望远镜的主流设计。

1671年牛顿又造了一架反射望远镜，作为礼物送给皇家学会。

1672年，法国一个叫做卡塞格林的人提出了另一种反射望远镜的设计。主镜为凹抛物面镜，副镜是凸双曲面镜，主镜光轴上也要挖一个小孔。这种形式的反射望远镜在后来的光学乃至射电望远镜中也经常使用。

天文学家可用望远镜看到新的天体，把远的物体拉近变大。但望远镜刚发明时，角度和位置的测量还是用传统的古典天文仪器。人眼的分辨角约为1′到2′，加上仪器本身的误差，古典天体测量的精度很难再提高。第谷致力于天文测量精度的提高，达到了古典天体测量精度的极限，其结果也只比1′稍好点。目视望远镜的理论分辨角为（140/D）″，D为用毫米表示的望远镜口径。口径为10cm的望远镜，分辨率可达1.4″。可见，望远镜用于角度和方位的测量，可大大提高测量精度。



图7.5　动丝测微计测量恒星角距离示意。



图7.6惠更斯,出生于荷兰海牙，他提出了光的波动理论；发明了摆钟、复合目镜；参与解决经度问题。在他死后三年出版的《宇宙论》中总结了他对太阳系和太阳系外宇宙的见解。他提出别的行星上也有生物，主张恒星都是太阳，并以此为出发点估算出天狼星距离地球比太阳远27000倍。

1638年，一位叫做威廉·盖斯科因的英国业余天文爱好者使用一架开普勒式望远镜进行观测时，发现一只蜘蛛在他的望远镜的焦面上结了一个网，这张网正好叠加在望远镜所成的像上。盖斯科因由此意

识到可以在该平面上装上十字发丝，以此精确确定视场中心，使望远镜精确校正到目标物上。盖斯科因在望远镜上安装了他发明的“测微计”，他于1644年死于英国内战，他的技术于17世纪50年代在牛津被采用，并加以改进，演变为具有很高精度的动丝测微计。但赫维留斯、胡克等人反对把望远镜和传统仪器结合起来测量天体位置，他们认为传统仪器的测量精度已经足够。

有了望远镜这件利器，通过惠更斯、卡西尼、罗默等许多实测天文学家们的杰出工作，近代方位天文学各方面的研究都被推到了一个新的高度。

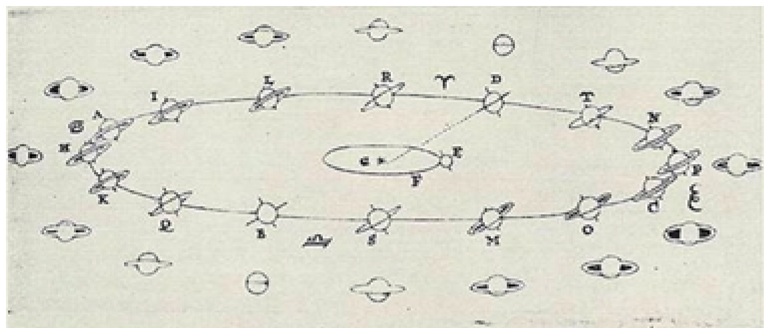


图7.7　惠更斯以土星光环解释土星奇怪视形状的示意图。

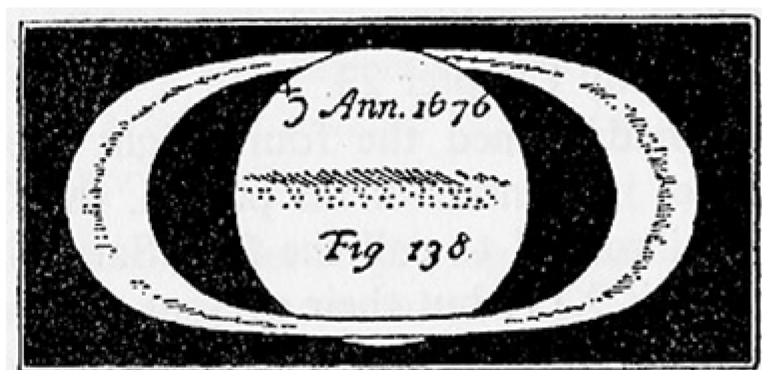


图7.8　卡西尼绘制的土星光环缝隙。



图7.9卡西尼在巴黎天文台建立起一个“卡西尼王朝”，他去世后他的儿子、孙子和曾孙依次继任巴黎天文台台长之职。

伽利略曾对土星奇怪而多变的外形迷惑不解，此后近50年间，土星的奇怪形状得到许多观测者的描绘，但没有人能够说清楚其中的道理。惠更斯亲自磨制了更大的透镜，制作了更好的望远镜，于1655到1656年间解决了土星形状之谜。但是他没有立刻公布他的答案，而是于1656年3月公布了一串字符：Aaaaaaabccccсdeeeeegii iiiiilllmmnnnnnnnnnooooppqrrsttttttuuuuu，这些字母组成的一句拉丁文就是他的答案。据说惠更斯是为了给别的观测者保留一些探索的乐趣，并同时确立自己的优选权才这么做的。1659年惠更斯公布了谜

底：Annu lo cingitur, tenui, plano, nusquam cobaerente,adeclipticaminclinato。翻译成中文就是："有环围绕，环薄而平，到处不相接触，与黄道斜交。"惠更斯还是土星的第一颗卫星泰坦（土卫六）的发现者。

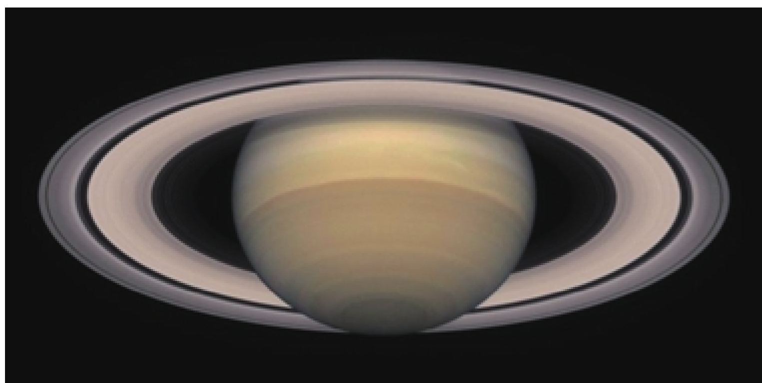


图7.10　哈勃太空望远镜拍摄的土星及其光环。

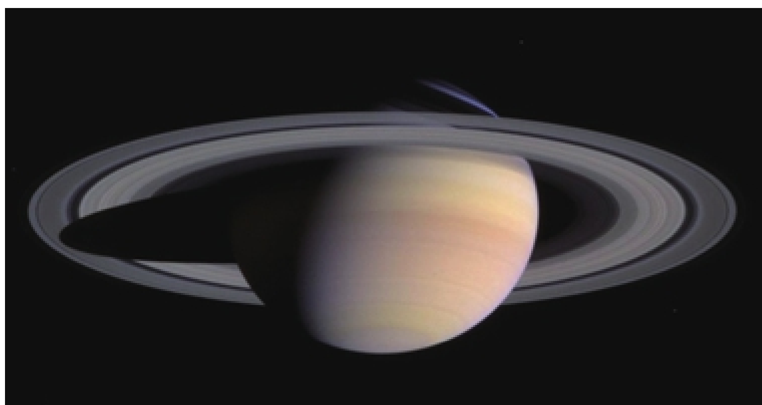


图7.11　卡西尼号于2004年3月拍摄的土星及其光环。



图7.12　罗默肖像。

1666年巴黎科学院刚成立便提请国王建造一座天文台。科学院从欧洲各地招募天文学家，1669年从意大利招来卡西尼并任命他为台长，负责筹建巴黎天文台。早在意大利的时候，卡西尼就对木星和木卫进行了仔细观测和研究。他根据伽利略曾经提出过的设想：把木卫绕木星的运动看做一台遥挂在天上的时钟，以此来解决海上航行船只的经度难题。因此卡西尼长期致力于编制精确的木卫历表这项工作。

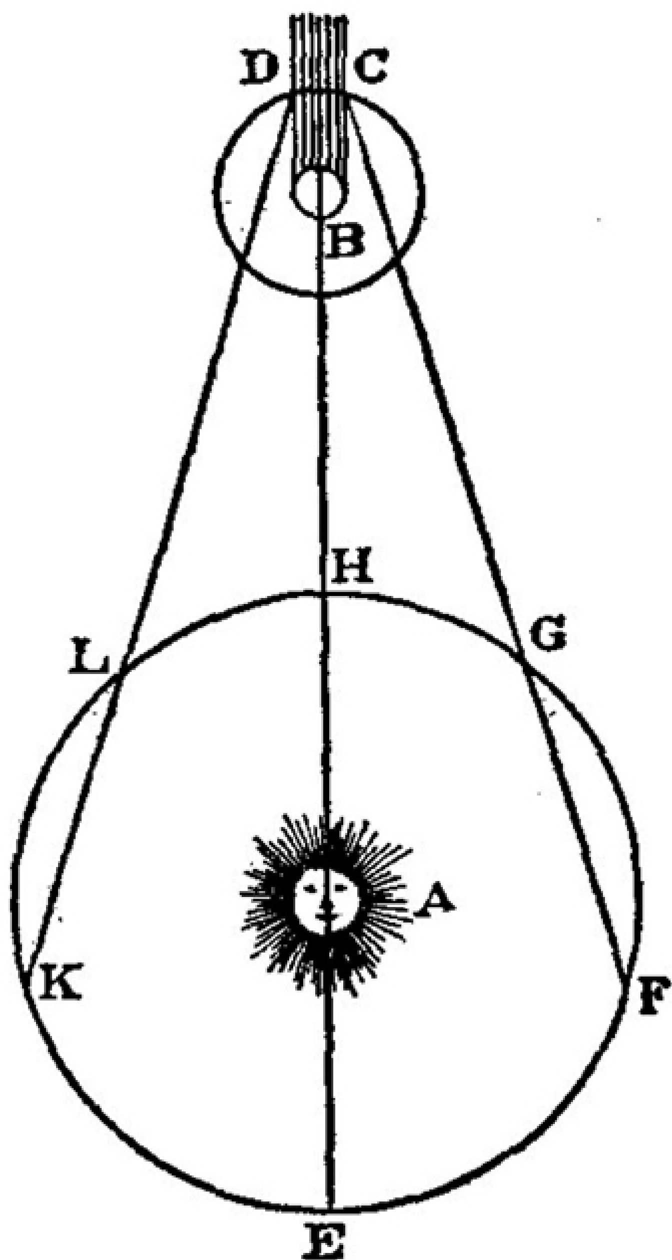


图7.13　1676年罗默《光速的测量》一文中插图。

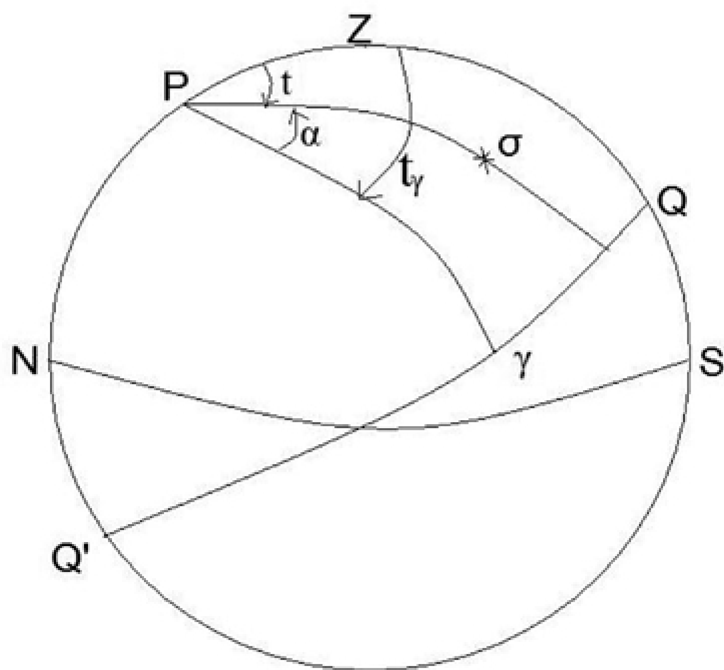


图7.14春分点γ连续两次上中天被定义为一个恒星日。这样，用小时表示的春分点时角tγ在数值上等于该地的地方恒星时s。对任一天体σ，其赤经α和时角t满足：$s = t_\gamma = \alpha + t$。当天体上中天时其时角$t = 0$，所以$s = \alpha$，也就是说，任何瞬间某地的地方恒星时在数值上等于该瞬间上中天的恒星赤经。

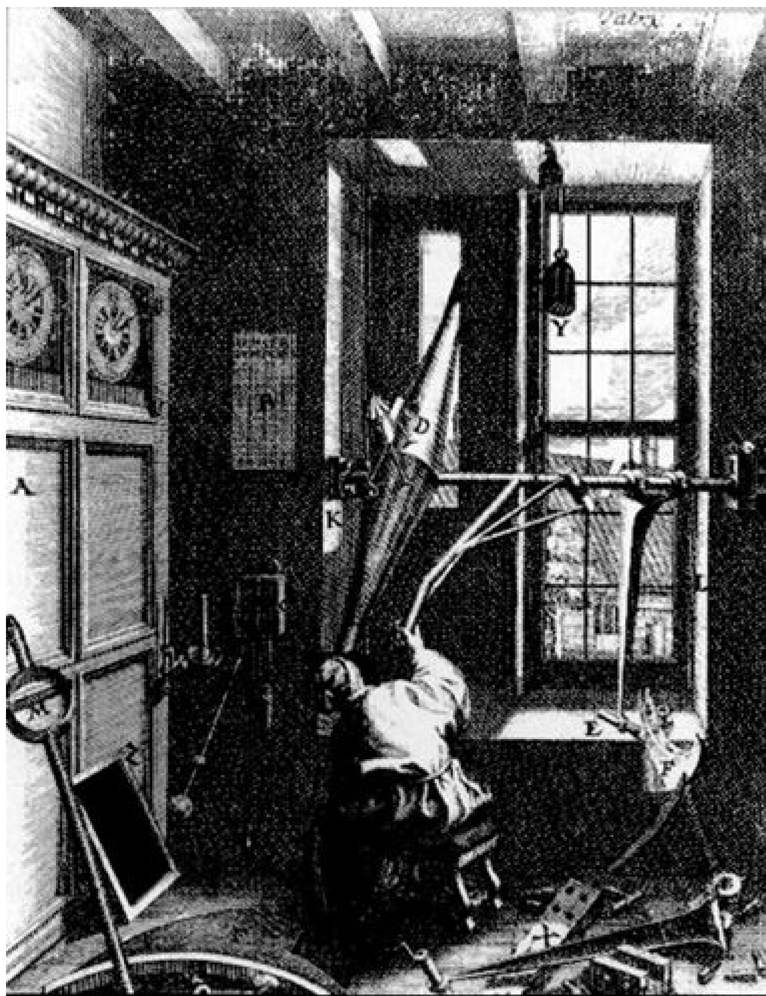


图7.15　罗默在用中星仪观测。

在巴黎天文台，卡西尼利用木星斑纹测定了准确的木星自转周期，并猜测这些斑纹是木星上的大气现象。他用同样的方法也准确测定了火星的自转周期。1671年卡西尼用自己为巴黎天文台定制的望远镜发现了土星的第二颗卫星土卫八；1672年发现第三颗土卫五；1684年又发现了土卫四和土卫三。1675年卡西尼在土星光环里发现一个圆形的空隙，现在仍用他的名字命名这一条缝隙。

至于土星光环的成因，是由于在像土星这样的中心天体形成的引力场中，在离开中心天体一定距离内具有一定体积但结构松散的物体，不能靠其自身的万有引力聚合成球形。法国天文学家洛希首先算出这个距离极限，现在称为洛希极限。

1672年丹麦人罗默来到巴黎天文台，参加卡西尼对木卫的观测。

经过一段时间的观测后罗默发现卡西尼的木卫历表（特别是木卫一历表）有一种误差，当地球处在奔向木星阶段时木卫一被木星掩食的时刻比历表预测的要早，在地球处在离开木星的阶段时木卫一掩食的时刻比历表预测的晚，一早一晚总共相差22分钟。罗默推断这是由于光从木星到地球需要花去一定时间，也就是说光速有限而非无限。罗默估计光越过一个地球轨道半径需要11分钟（现在值为8.25分钟）。光以如此巨大的速度飞行，这在当时是一个令人惊异的结论。

罗默还最早设计制造了专门用于测量天体赤经的中星仪。这种中星仪的望远镜主光路沿当地子午面安装，可上下调节仰角的大小，但不能左右移动。随着地球转动，恒星会依次进入望远镜的视场。当某恒星位于视场中心时，记录下该时刻的地方恒星时，就是该恒星的赤经。

2.海上经度的测定

随着大航海时代的到来，探险、商业、军事等各种航海船只航行到地球上的各个角落。这些船只经常需要知道一个关键信息，即他们到底航行到了地球上的什么位置，也就是需要知道船只的经度和纬度。纬度的测定相对简短，古希腊人就已经知道北极星的出地高度就是当地的地理纬度。然而经度的测定却成了一个相当棘手的难题。

根据恒星时的定义不难得到，地球上A、B两点在同一瞬间的地方恒星时之差等于两地的经度差，即：SA - SB = λA - λB。假设航海船只航行到了陌生的A地，要求A地经度λA，则需要知道：1.已知地点B地的经度λB；2.B地的地方恒星时SB；3.A地的地方恒星时SA。在这三个未知量中，λB可以通过事先测定而获得。未知地点的地方恒星时SA不难通过天文手段实测获得。最难确定的是已知地点的地方恒星时SB，它是解决海上经度问题的关键所在，整个17世纪和18世纪的大部分时间，许许多多智慧的大脑都在为解决这个难题绞尽脑汁。

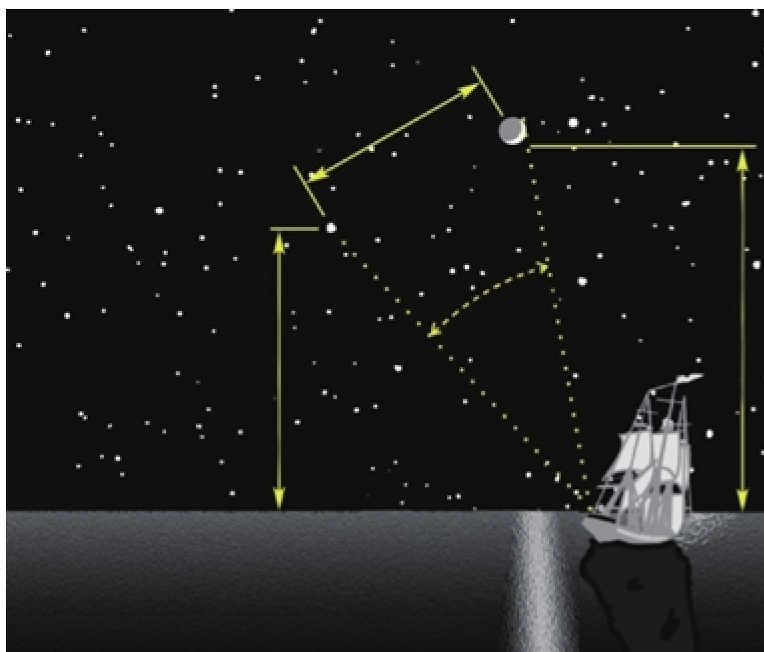


图7.16“月亮钟法”示意图，利用月亮与某一恒星之间的角度来测算出月亮的位置。

1524年西班牙查理五世的朋友数学教授班内威兹建议用月亮在恒星中的穿行来指示标准时间SB，这就是“月亮钟”的方法。但当时没有能力事先算好精确的月亮位置表，也没有精确的恒星星表，所以这种方法只停留在理论上。1530年荷兰的数学教授弗里修斯提出建议，用一具始终走本初子午线地方时的精确机械钟来给出标准时间SB，但当时还没有这样的机械钟，所以该方法也不能实行。



图7.17 1675年弗拉姆斯蒂德被任命为皇家天文学家，要求他“以最谨慎和最勤奋的态度全身心地投入订正天体运行表、恒星位置表等项工作之中，以找到人们渴望已久的对航海至关重要的那些地方的经度”。

1598年西班牙国王高价悬赏解决经度问题，荷兰也高价征求这个

问题的答案。

1612年伽利略提出用木卫掩食来指示时间，他算出了一张木卫运行表送到了西班牙和荷兰。但是一方面这张表的精度有限，另一方面，当时的长焦距望远镜无法在摇晃的甲板上进行木卫的观测，所以伽利略没有得到这笔奖金。伽利略的设想后经卡西尼的完善，能比较精确地测定陆地上的经度，但在摇晃的甲板上，这种方法仍不实用。

海难此起彼伏，航行仍非常危险。17世纪下半叶，一位法国人到伦敦去宣传“月亮钟”定经度法，英国国王查理二世听了这个宣传后指定了一个委员会来研究这种方法的可行性。该委员会于1675年向剑桥大学的一位年轻天文学家弗拉姆斯蒂德征求意见。弗拉姆斯蒂德指出当时已有的恒星星表和月亮运行表都不够精确。



图7.18格林威治天文台的“弗拉姆斯蒂德楼”，弗拉姆斯蒂德一直生活、工作在这里，直到去世。该楼由雷恩和胡克设计，建于1675-1676年间。

图7.19　John Hadley设计的双反射象限仪，也称为八分仪。

提供的月球理论导致的月球位置误差有好几分，海员据此判断船只的位置误差可达100英里。



图7.20　皇家天文台编印的《航海年历》。

查理二世听到弗拉姆斯蒂德的意见之后，决定组织力量重新测定恒星和月亮的位置，制订新的星表，以供航海之用。

弗拉姆斯蒂德提出为了完成这项工作，需要一个永久的天文台。在雷恩的建议下，天文台建在伦敦近郊格林威治皇家公园的一座小山

上，于1675年8月10日奠基。弗拉姆斯蒂德作为皇家天文学家，自动成为天文台第一任台长。他在该天文台工作了44年，使用一架2米多长的墙式六分仪，共测量了3000多颗恒星的视位置。

1712年，根据皇家学会尽快出版星表的要求，哈雷未经弗拉姆斯蒂德同意就将部分观测资料归算后出版。经弗拉姆斯蒂德本人同意的星表直到他去世6年后的1725年才得以出版，叫做《不列颠星表》。



图7.21　约翰·哈里森，一位自学成才的木匠和钟表匠。

为了推动海上经度问题的快速解决，1713年英国成立了经度局，并悬赏海上测定经度的实用方法。测定精度为1°，赏金为一万英镑。精度加倍，赏金也加倍。

1731年一种现代六分仪的前身双反射象限仪问世，海员们得以在

晃动的甲板上精确测定天体之间的角距离。加上《不列颠星表》，任务完成了三分之二。





图7.22　哈里森的H1（上）和H4（下）。

还剩下一份精确的月离表等待编制。

到18世纪中叶，巴黎科学院和圣彼德堡科学院也都悬赏解决月亮运动的理论问题。

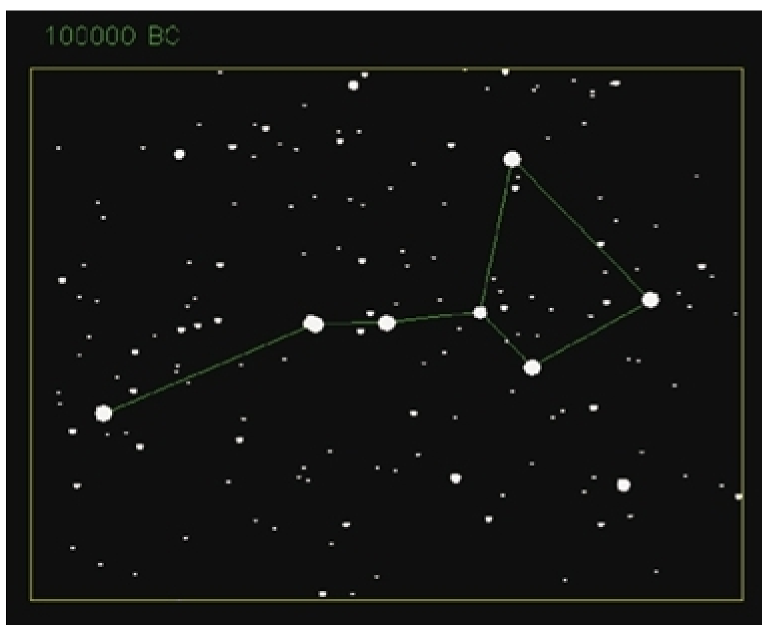
哥廷根大学的迈耶尔教授利用欧拉提出的月亮运动理论编制出了一份相当精密的月亮运行表，并在1754年送到了伦敦。后来他的遗孀从英国政府获得3000英镑的奖金，而欧拉仅得到300英镑。

利用迈耶尔的理论，第五任皇家天文学家马斯基林在1766年编算了《航海年历》，此后格林威治皇家天文台每年都编印一部《航海年历》，详载下一年中每月每日每时月亮、太阳、行星和大多数亮恒星的视位置，据此海员们能够比较方便地通过月亮位置确定经度。

迈耶尔改进的方法提供的定位精度约在30km左右，并且每次测量颇为费时，在没有月亮的日子还无法使用。所以18世纪以后有许多人在力求制造更为准确的航海机械钟方面下功夫，这种技术是从惠更斯的船用钟技术发展起来的，其中最杰出的一位当属英国钟表匠哈里森。

1735年哈里森制作了第一架航海钟H1，经过两年的测试，效用被认可。经度局奖了他250英镑。H1长、宽、高各3英尺，黄铜制成，重72磅，钟面指示出时、分、秒和日期。

1764年哈里森带着他制作的H4乘一艘军舰出海。H4不负众望，它的日差只有0.1秒，使用它来测定经度，误差只有2km左右。为此哈里森先得到了一万英镑奖励，等到H4的复制品通过测试后再发给他剩下的一万英镑。库克船长携带着H4的复制品完成了向南极的航行（1772—1775），他说："我们从未迷失航向，钟走得很好。"



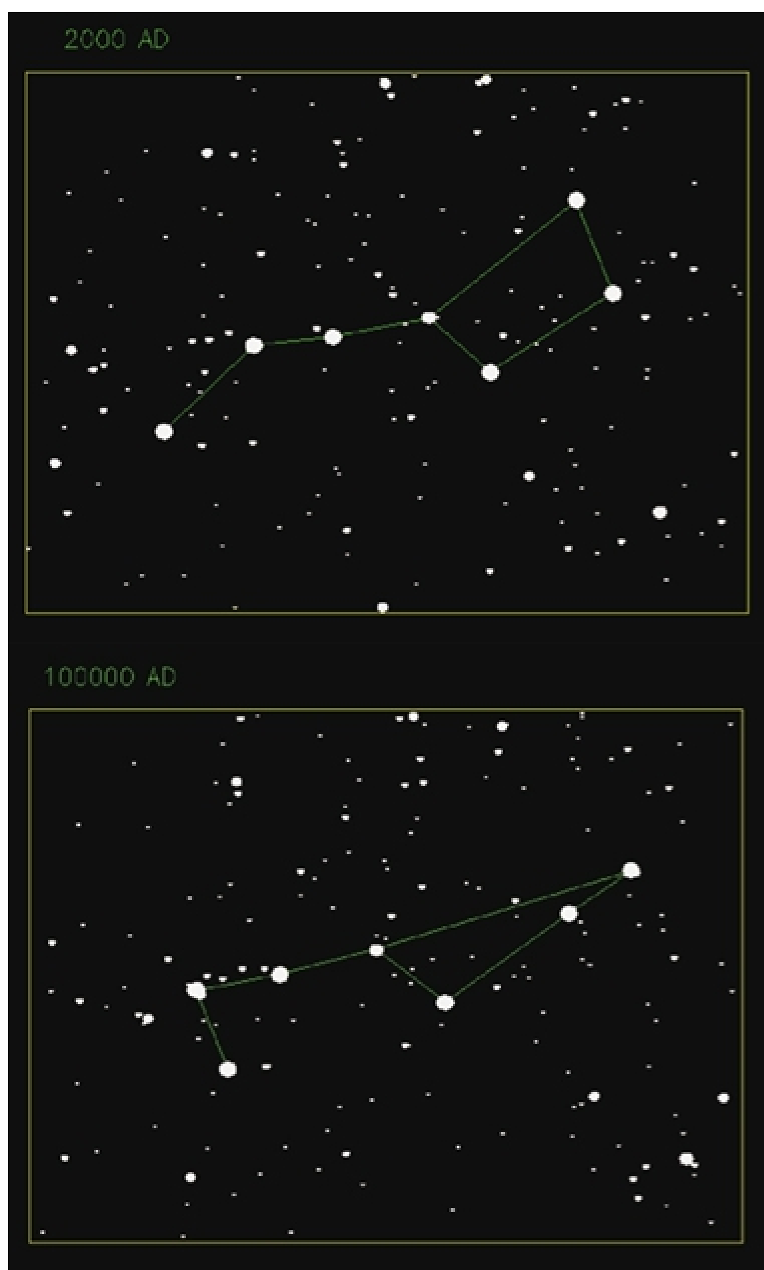


图7.23　自行改变北斗七星的星座构形。

上：公元前10万年的北斗七星；中：公元2000年的北斗七星；下：公元10万年的北斗七星。

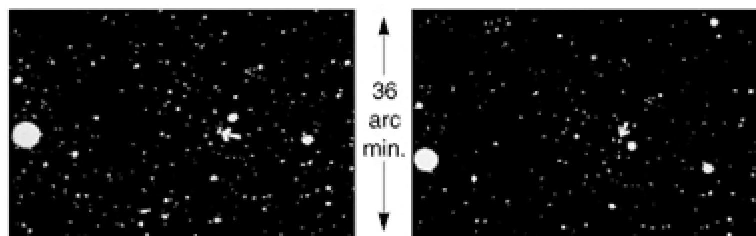


图7.24两张拍摄时间相隔22年的底片显示自行量最大的恒星巴纳德星（箭头所指）的空间视位置变化。

3.恒星的位置变化与距离

恒星的位置变化是指恒星的坐标位置随着时间发生变化，可分长期变化、周期变化和不规律变化等。其变化的原因，一是由于恒星本身在运动，二是地球的运动有各种规律和不规律的变化。这些变化的数值量级都是比较微小的，之所以能够被发现，得益于18、19世纪望远镜制作水平的提高和各种辅助观测手段的使用。

1718年，哈雷将其测量的恒星位置与古希腊喜帕恰斯、托勒密等人所作的观测加以比较，试图研究岁差量的精确大小。

但是哈雷发现，在扣除了岁差和黄赤交角的变化所带来的坐标位置变化效应之后，喜帕恰斯和托勒密测定的某些恒星，如大犬座α（天狼星）、小犬座α（南河三）、牧夫座α（大角星）、猎户座α（参宿四）、金牛座α（毕宿五）等亮星的黄纬与他测得的数值之间相差半度到1度之多；而如果将他自己的观测值与第谷的观测结果加以比较，那么这种差异显得比较微小。

哈雷由此推断恒星其实不是固定在天空中的，它们有自己的运动，它们的相对位置随着时间的推移会发生变化。恒星的这种运动被叫做自行。恒星每年的自行量是微不足道的，譬如天狼星的年自行量为：赤经自行－0.63″，赤纬自行＋1.20″；大角星的为：赤经自行－1.40″，赤纬自行＋2.01″。但是自行量经长时间的积累之后，其效果还是很明显的，将会彻底地改变曾经熟悉的星空图案。

还有一种恒星的位置变化以一种出人意料的方式被发现。鉴于地球绕日作公转运动的实测证据—恒星周年视差一直没有被观测到，英国人布拉德雷立志要寻找恒星的周年视差，解决这个天文学史上久拖未决的难题。

当时居住在伦敦附近的业余天文观测者莫利纽克斯决定测量天龙座γ星的周年视差。布拉德雷跑去协助他。他们从仪器制造商格雷厄姆那里定做了一架专门用来测量头顶正上方恒星位置的望远镜。1725年这架“天顶测量仪”被安装在莫利纽克斯家房子的烟囱上。天龙座γ星正好从头顶经过。



图7.25布拉德雷于1711年入剑桥大学学习，1719年获得神职，任蒙默斯郡教区牧师。1721年成为牛津大学的萨维廉天文学教授。1742年接替哈雷成为皇家天文学家。

莫利纽克斯和布拉德雷仅仅测量天龙座γ星沿南北方向的一维坐标。简单的计算表明，周年视差会导致这颗恒星在12月18日达到其最南位置。但是布拉德雷于12月21日发现它走到比几天前更靠南的位置，在随后的几周里继续向南，直到次年3月，它走到了比其12月时的位置更靠南约20″时才停止。此后这颗恒星开始转向北移动，到6月回到它在头年12月时的位置，9月达到其最北端。这样，天龙座γ星一年里头在南北方向上位置变化达40″。

这显然不是恒星的周年视差。布拉德雷认为应该对更多的恒星进行考察。为此，他委托格雷厄姆制作了另一架视场更大的天顶仪，对

其他几颗偏离天顶的恒星进行观测。更多观测证明恒星的这种运动模式确切无误，它们在望远镜视场中位置变化的最大摆幅也是一样的，这进一步证明这种位置的周年变化不是周年视差。但是对这一现象，布拉德雷却迟迟找不到合理的物理解释。

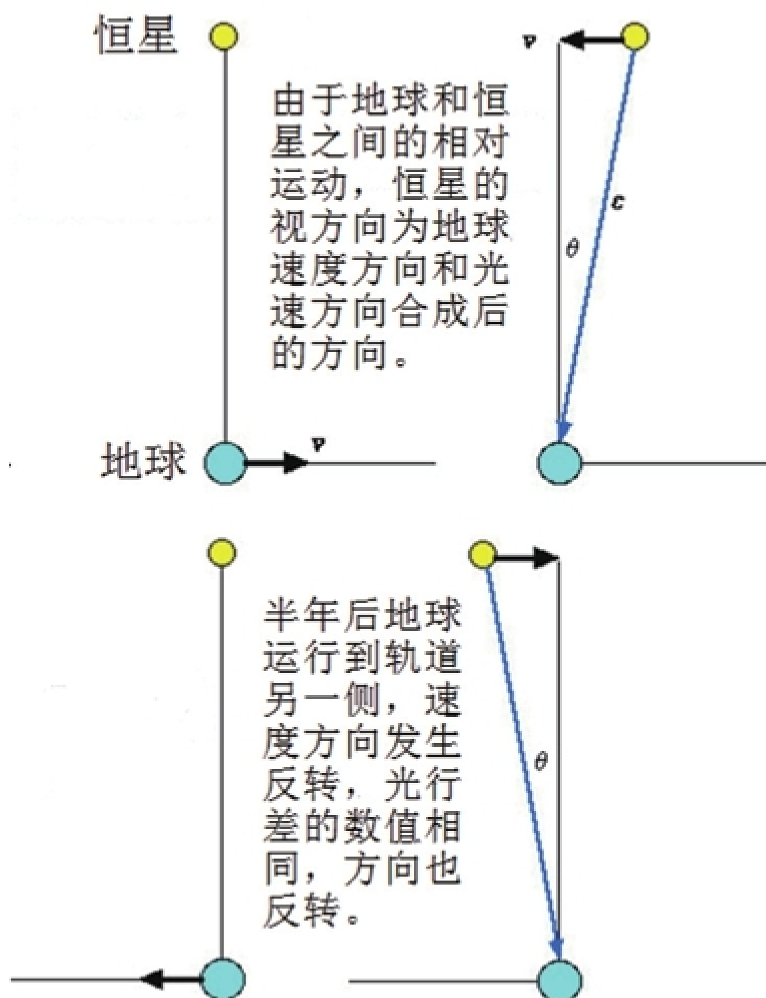


图7.26　恒星光行差成因图示说明。

据说，在1728年的某一天，当布拉德雷在泰晤士河上泛舟游玩时，突然找到了解决问题的答案。他注意到当船转向时，船上的风向标也随之转向，这当然不是由于风向发生了变化，而是因为风向标的指向不仅取决于风的速度，也取决于船的速度。他想到罗默对光速的测定，如果光速是有限的，那么在地球上看到的星光的方向不仅取决

于该恒星所发出的光的速度，也取决于地球的运动速度。想通了这点之后，布拉德雷向哈雷写信报告了这一发现，该信后来被发表在皇家学会《哲学学报》上。

尽管光行差的发现是以全然未曾预料到的形式出现的，但它为地球环绕太阳的运动提供了确切的证据。从光行差可以推得光速是大自然的一个常数，这是爱因斯坦狭义相对论的主要实验基础之一。布拉德雷计算出光从太阳到地球需要8分12秒，与现代值的误差在8秒之内。

布拉德雷在探寻周年视差上的失败表明，这种视差太小了，所以即使用他的那种高精度的仪器也探测不到。最近的恒星周年视差也一定小于0″.5 - 0″.4。

因此恒星距离地球至少为日地距离的400,000—500,000倍。

4.寻找恒星周年视差

布拉德雷对恒星距离的估算表明测量恒星周年视差是对望远镜制作技术的极大挑战。一直要等到新一代仪器制造家出现、天文仪器的精度得到很大改进之后的19世纪早期，天文学家才成功地挑战了测量恒星周年视差这个难题。

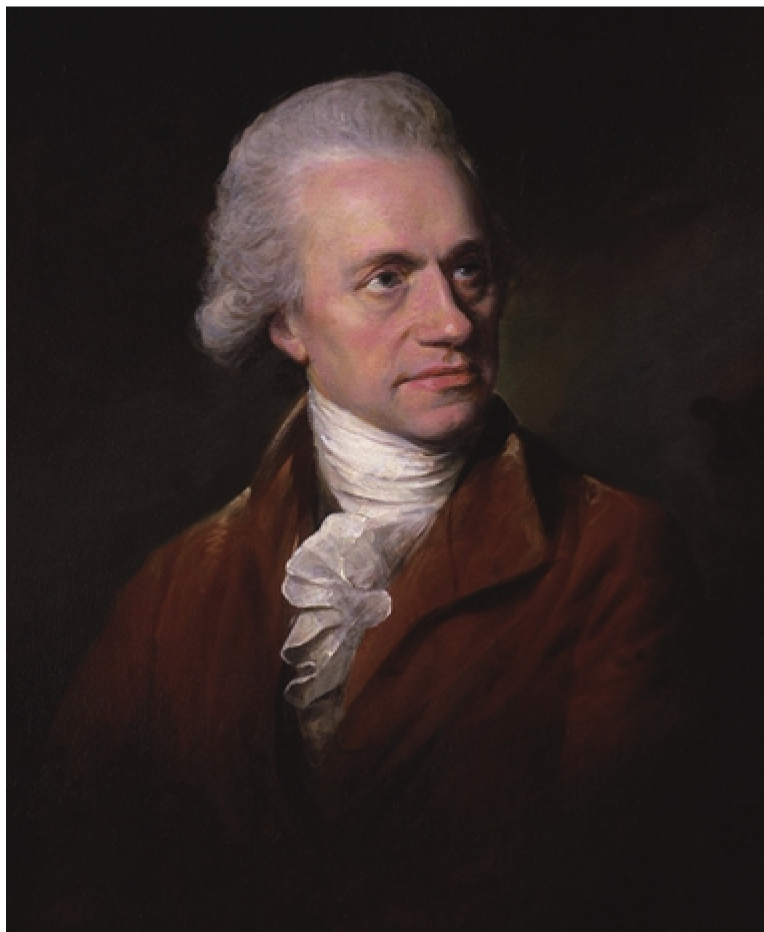


图7.27赫歇尔于1738年出生在德国汉诺威的一个军乐师的家庭，由于厌倦这种生涯，他做了逃兵，于1757年偷渡到英国。在英国以音乐谋生之余，他自学了拉丁语、意大利语，探究音乐理论并接触了数学、光学和牛顿的书。

但对于18世纪晚期的天文学家来说，这个难题一样具有很大的诱惑力。跟布拉德雷一样，威廉·赫歇尔也试图寻找恒星的周年视差。虽然同样没有成功，但也同样取得了许多其他卓越的天文学成就。



图7.28赫歇尔用来发现天王星的望远镜（复制品，藏于英国巴斯威廉·赫歇尔博物馆）。



图7.29　威廉·赫歇尔为西班牙国立天文台制造的大望远镜。

赫歇尔企图用他的望远镜测出恒星周年视差。他设想：如果在某一方向上存在着靠得很近而实际上离我们的距离相差很悬殊的两颗星（光学双星），那么由于地球的周年运动，近星相对于远星会有周期性的位移，由此可以定出近星的视差。这种较差测量法是伽利略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中首先提出来的。

赫歇尔尽量搜索双星。1782年和1784年他两次发表双星和聚星表，其中511对双星是他的新发现。问题是：双星数目如此之多，以至于远远超出了两颗恒星由于透视效应偶然接近的概率。这说明，大部分双星必定有物理上的联系—物理双星。

到1802至1804年间，赫歇尔发现好几对双星存在一个子星绕另一个子星的轨道运动。这表明它们被某种引力束缚在一起。但这种力是否就是牛顿的引力呢？

1827年巴黎天文学家萨瓦里证实大熊座ξ的双星在围绕其引力中心的椭圆轨道上运动，与牛顿理论所要求的一样，从而证明了万有引力定律同样适用于远离太阳系的恒星系统。赫歇尔寻找周年视差虽然失败，但为万有引力在宇宙中的普适性提供了一个重要证明。

在所有试图寻找恒星周年视差的天文学家中，德国人贝塞尔首拔头筹。

要找到周年视差，非常关键的一点是要选择离地球最近的恒星作为观测对象，因为越近视差越大。开始天文学家认为越亮的恒星距离地球越近，后来发现恒星的固有亮度差别很大，所以转而选择自行大

的恒星。

德国天文学家斯特鲁维在1837年发表的一篇论文中提出近星的三条判据：1.它是否最亮的恒星之一？2.它是否有较大的自行？3.如果它正巧是“物理双星”，那么看两星在望远镜视场里是否分得比较开？



图7.30贝塞尔15岁开始在不来梅一个商人会计室里工作。他精通数学，又爱好天文，在业余时间开始对哈雷彗星在1607年那次回归的观测资料进行归算，求出了哈雷彗星的轨道。这项工作发表在了专业期刊上，使得他有机会步入职业天文学家的行列。1806年贝塞尔成为施罗特的天文助手。1810年成为柯尼斯堡新天文台台长。1838年发表天鹅座61的周年视差，了却了天文学家300年来的宿愿。

要找到恒星周年视差，还有一个必要条件是要拥有当时最精密的仪器。斯特鲁维手头拥有当时世界上最大的24厘米折射望远镜，为著

名的德国光学仪器制造者夫琅和费所造。

斯特鲁维选择织女星作为测量对象。

这颗星格外明亮，自行也很大，达到每年0.35″，因此符合他的近星判据三条中的两条。1837年，他宣布从17次观测结果中可以推断出该星有1/8角秒的视差，这与现代值颇为接近。但他以为偏小，到1840年给出了近100次观测的结果，结果将织女星的视差值增大到了原来的两倍。

贝塞尔有一架夫琅和费造的16厘米孔径“太阳仪”，它本来是用来测量太阳角直径的，但也是一架测量小角度的理想仪器。贝塞尔把他的仪器对准了天鹅座61。令人惊讶的是，天鹅座61很暗，星等只有5等，但它的自行却很大，每年达5.2″。

他于1834年开始观测，但不久因为哈雷彗星的到来而转移了兴趣。直到1837年，他才重新恢复对天鹅座61的观测。受到斯特鲁维初步结果的鼓励，他用一年多的时间对天鹅座61进行了高强度的观测。

1838年10月23日贝塞尔托人捎了一封信给时任英国皇家天文学会主席的约翰·赫歇尔，向他报告了天鹅座61的周年视差为0.3136″±0.0202″。约翰·赫歇尔对此表示了祝贺，并感叹：“我们总算活着看到了探测恒星宇宙的测深索终于测到了它的底部。”

1839年初在好望角天文台工作过的苏格兰天文学家亨德森也宣布，他测得南天球半人马座α的周年视差为0.91″。亨德森所用的仪器比不上贝塞尔的，也比不上斯特鲁维的，但他选择的这颗恒星亮度很大，有很大的自行，而且是颗双星，其伴星有着很大的分离角，因此它满足了斯特鲁维的全部3条近星判据。事实上亨德森很幸运地挑选了离太阳系最近的一颗恒星。

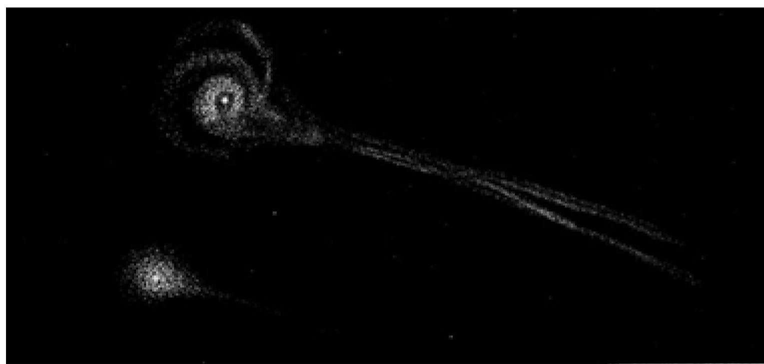


图7.31　天文学家描绘的比拉彗星1846年回归时分裂成两颗的情形。



图7.32　塞奇绘制的比拉彗星1852年回归时的情形。



图7.33　描绘1833年狮子座流星雨壮观情形的版画。

到19世纪30年代末，恒星周年视差的存在终于被观测证实，但这一证实的意义主要已经不在于证明地球的绕日公转运动，而是在于提供了一种新的把握宇宙尺度的手段。此后天文学中多了一个度量距离的单位“秒差距”。1秒差距等于3.2616光年，或206265天文单位，或308568亿公里。在所有测量恒星距离的手段中，基于三角学原理的

恒星周年视差法提供了一把最为可靠的“量天尺”，是探测更遥远宇宙深度的基石。

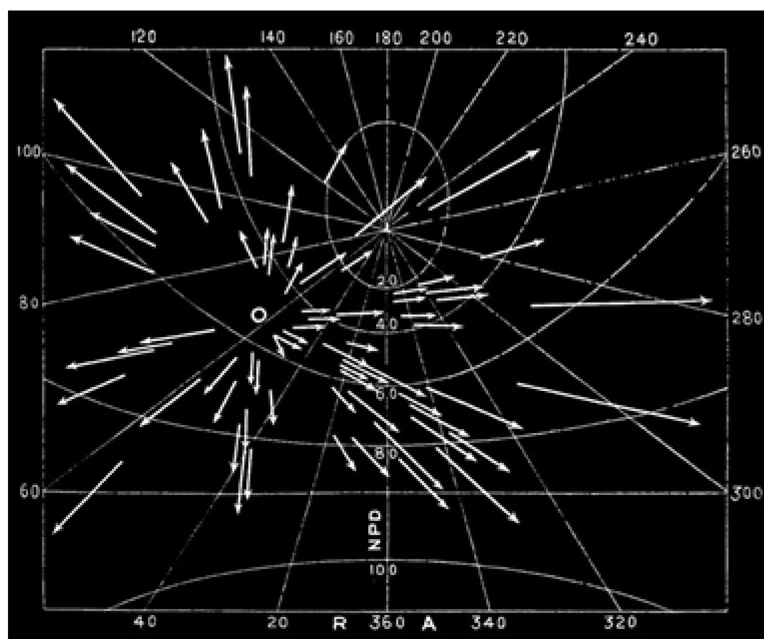


图7.34　绘图法确定流星雨的辐射点。



图7.35　照相法确定流星雨的辐射点。

5.太阳系的更多细节

随着19世纪望远镜制造技术的提高，天文学家们在向宇宙更深处探寻的同时，太阳系中的一些细节也慢慢地被揭示出来。

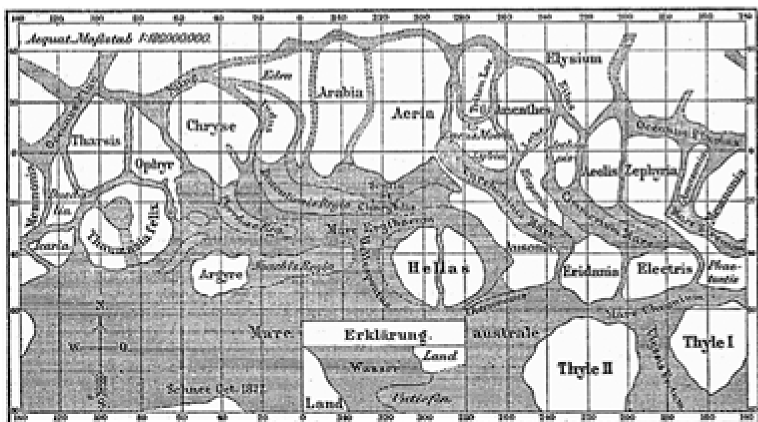


图7.36　斯基帕雷利绘制的火星图。

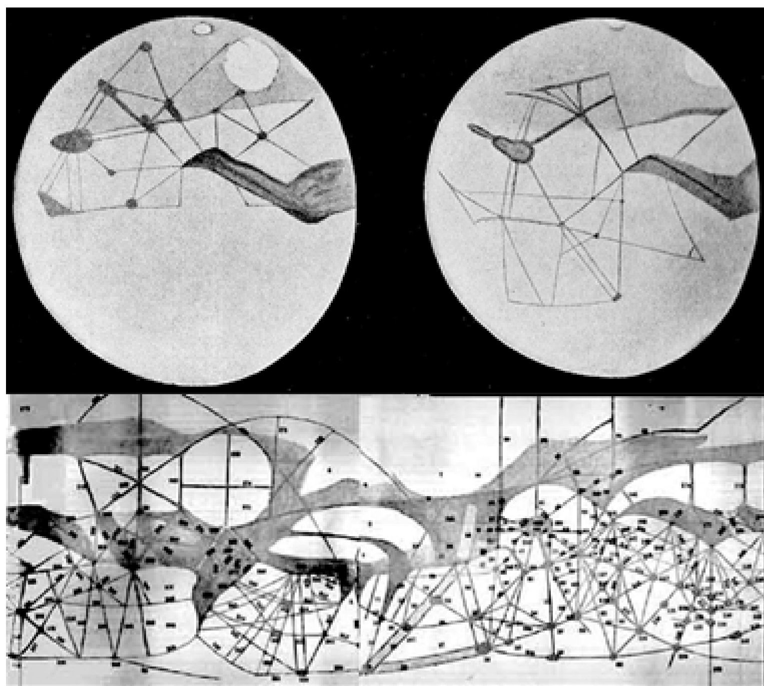


图7.37　洛威尔绘制的火星表面和火星运河图。

实际上，当然不存在这样的火星“运河”。后来法国天文学家安东尼阿迪和美国天文学家巴纳德都指出这些“运河”是人眼在接近视力极限情况下出现的错觉。

彗星已慢慢变为天空中的常客了。法国天文学家梅西耶在18世纪下半叶共发现了21颗新彗星，他是系统搜寻彗星的第一人，路易十四戏称他为“彗星侦探”。

法国天文学家庞斯一生发现了36颗彗星。德国天文学家恩克对其中1818年发现的一颗彗星计算了轨道，发现它的周期很短（约3.3年），经过进一步研究恩克发现，默香于1786年、卡罗琳·赫歇尔于1792年、庞斯于1805年观测过的三颗彗星其实是同一颗彗星。于是他预言这颗彗星于1822年返回近日点。预言果然得到证实，这是按照预测回来的第二颗彗星，被叫做恩克彗星。

1826年，奥地利人比拉发现一颗彗星，桑提尼算出它的轨道，确定它的周期为6.6年。1832年比拉彗星被人观测到，但1838年失去了踪影。1846年1月13日这颗回归中的彗星突然分裂成两颗，相距日益增大。1852年又双双回归，彼此间距更大。

以后两次回归都没有被观测到。

在1872年和1885年的11月27日，天空中突然出现了极为壮观的流星雨，辐射点在仙女座，这个位置恰好是地球轨道与比拉彗星轨道相交的地方。人们认识到仙女座流星雨正是比拉彗星瓦解时形成的。

约翰·亚当斯计算出了11月份仙女座流星体的轨道，其他天文学家也同样计算出了8月英仙座和4月天琴座流星体的轨道。这些结果确认了意大利天文学家斯基帕雷利的一个预见：流星体在空间的轨道跟一些彗星的轨道很相似。不久人们确认英仙座流星雨的轨道是1862年亮彗星的轨道，狮子座流星雨的轨道是1866年坦普尔彗星的轨道，天琴座流星雨轨道是1861年彗星的轨道。

1830年起，德国天文学家梅德勒开始对月球和火星作精密观测。1837年他发表一本绘有巨幅月面图的专著。他认为月球上无水、无空气、无生命，首次正确地阐明了月球世界的主要物理特征。1849年左右梅德勒和合作者比尔绘成第一幅火星图，并采用了经纬线作坐标。

1877年火星大冲时，意大利天文台台长斯基帕雷利用口径22厘米的折射望远镜观测火星时，看到火星圆面上一块块暗区之间有若干线条相连，长达数千公里，他把这些线条叫做canali，意大利文是“天然的水道”，对应英文的channels，但被误译为canals（运河）。

1894年火星大冲时美国人洛韦尔仔细观测了火星，绘出了更多的

火星“运河”，并力主这些“运河”是智慧生物存在于火星的证据。他出版了《火星和它的运河》（1906）和《作为生命居所的火星》（1908）两本书来汇总他的观测成果。这两本书的名字很好地表达了洛韦尔的信念：火星上有智慧生物。英国科幻作家威尔斯（HerbertGeorgeWells）还把洛威尔关于火星智慧生物的信念虚构成小说《世界大战》，于是“火星人”可谓家喻户晓。

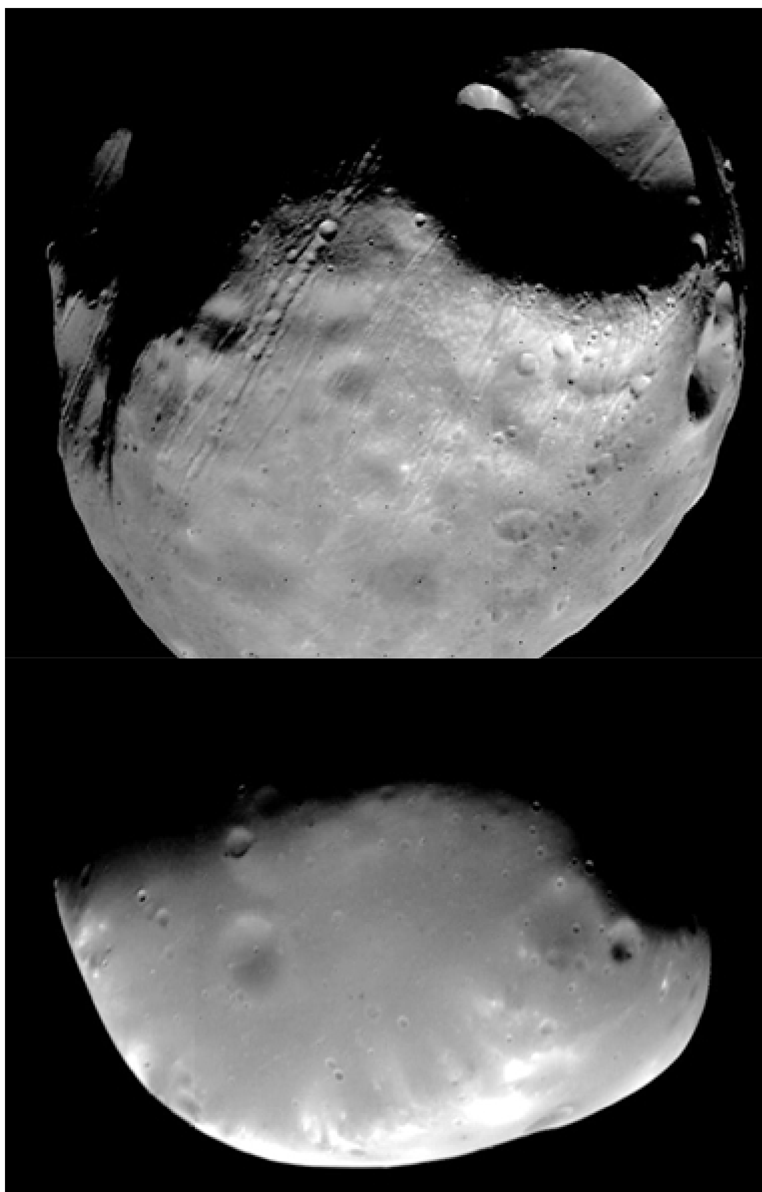


图7.39　福伯斯（上）与德莫斯（下）。

100年后的精确测量显示，这两颗火星卫星实在太小了，它们的形状也是不规则的，像两颗土豆，平均直径分别只有22.6km和12.2km。福伯斯离火星还非常近，以至于它绕火星公转一圈的时间（“1个月”）是火星自转周期（“1火星天”）的三分之一还不到。

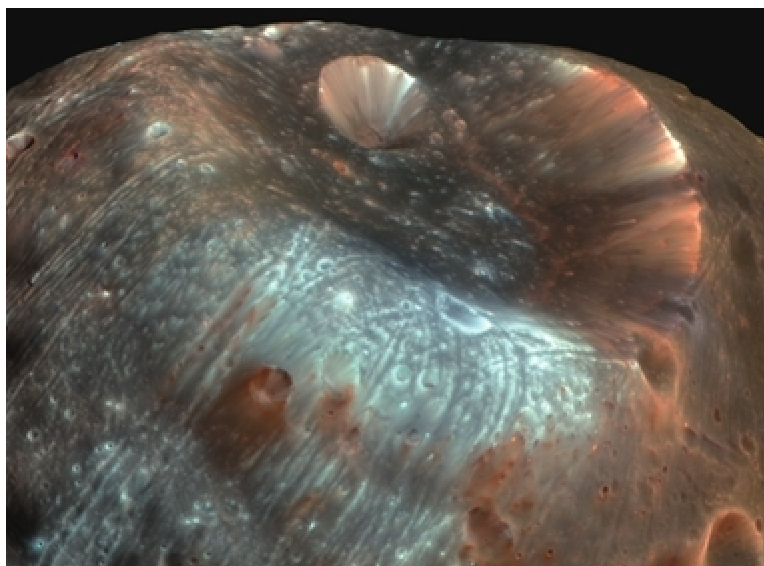


图7. 4 0 火卫一福伯斯上的斯蒂尼陨石坑（C r a te r Stickney）。

除月亮外，人类共用目视方法发现太阳系内的卫星20颗，其中17世纪和18世纪共发现13颗：

1610年，伽利略，四颗木卫；

1655年，惠更斯，土卫六；

1671年，G.D.卡西尼，土卫八；

1672年，G.D.卡西尼，土卫五；

1684年，G.D.卡西尼，土卫三、土卫四；

1787年，威廉·赫歇尔，天卫三、天卫四；

1789年，威廉·赫歇尔，土卫一、土卫二。

1846年10月10日，英国业余天文学家拉塞尔用他建造的一架口径61cm的反射望远镜观测海王星时，发现了海卫一，后来又发现天卫一和天卫二。1848年，美国天文学家邦德发现土卫七。

除了火星，地球以外的行星相继发现了卫星。1877年火星大冲时，美国天文学家霍尔用一架长13米、口径66厘米的折射望远镜观测火星，试图搜索它的卫星。多日的观测没有结果，他因失望而准备放弃搜索，他的妻子斯蒂尼鼓励他再作“最后一晚”观测。

霍尔在“最后一晚”发现火星附近有一个微小的运动天体，6天后又发现了第二颗这样的天体。通过一段时间的观测后，确认这是火星的两颗卫星。它们非常小，又很接近火星。霍尔用希腊战神和希腊爱神偷情所生的两个儿子福伯斯和德莫斯来称呼这两颗火星卫星。

1892年巴纳德使用里克天文台的焦距为18.3米、口径为91厘米的大折射望远镜发现了木卫五。从伽利略首次用望远镜发现木星的四颗卫星开始，到巴纳德用目视法发现最后一颗木卫五，人类共发现了20颗太阳系天然卫星，以后在地面上发现的卫星都借助了照相方法。





图7.38　霍尔和斯蒂尼。

第八章 天体物理学的兴起

天体物理学主要研究天体的物理特性、化学组成、内部结构等，它源于探测手段的更新和理论的进步。新探测手段如分光术、测光术和照相术等，在19世纪中叶几乎同时被运用到天文学研究中；理论方面，狭义相对论和量子力学被用于解决恒星大气理论、恒星物理状态和物理过程等。

1.新技术的使用和天文学的进步

肉眼配合望远镜观测天体混合光，只能对天体形状、结构等物理性质作有限探索，无法了解有关天体的温度、光度、压力、密度、磁场等以及化学组成。天体分光术的使用使得了解天体的这些信息成为可能。

天体分光术的产生是与对太阳的研究密切相关的。1666年24岁的牛顿进行了三棱镜分光实验。1802年英国物理学家沃拉斯顿在棱镜前加了一个狭缝来观测太阳，结果不仅得到了连续变化的彩带，在其中还发现了很多条暗线。

1814年德国光学家夫琅和费用他制成的第一台分光镜，一共数出太阳光谱里的574条暗线（夫琅和费暗线）。夫琅和费把其中主要的暗线用A、B、C、D等大写字母表示，一直沿用至今。

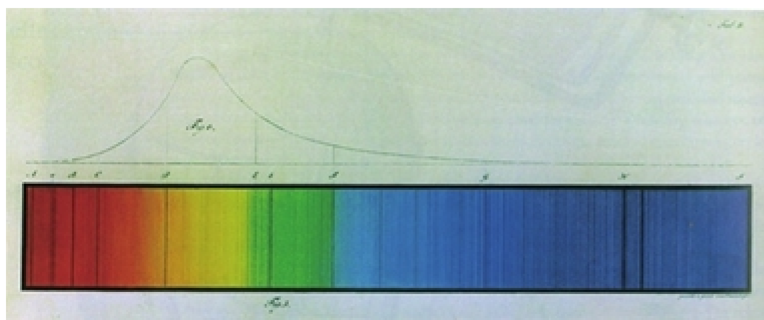


图8.1　太阳光谱线：夫琅和费暗线。

夫琅和费特别注意到太阳和许多恒星往往在橙黄色区域内都有一条很强的双重谱线，他把它标示为D线。当他用分光镜观测某些火焰的光谱时，发现在对应太阳光谱的D线位置上，有一条双重明线。对此现象，夫琅和费无法解释。

1858到1859年间，德国化学家本生把钠、钾、锂、锶、钡等不同物质放在他发明的煤气灯（本生灯）上燃烧时会发出不同的颜色，他想到根据火焰颜色来判别物质的化学成分，但在混合物里物质含量少，燃烧时它的火焰颜色就很难被观测到。



图8.2　夫琅和费肖像。

本生的朋友基尔霍夫建议把火焰的光分成光谱再进行观察。他们使火焰的光通过分光镜，发现钠、钾、锂、锶、钡等物质燃烧时产生不同的明线光谱。这样他们找到了一种根据光谱来判断化学元素的方法—光谱分析术。之后，本生忙于去发现更多的新元素。基尔霍夫则为40多年前夫琅和费发现的太阳光谱暗线所困扰。

钠具有两条黄色的明线光谱，但是在对应的太阳光谱位置上是两条暗线。基尔霍夫让太阳光穿过本生灯的火焰，并在本生灯上燃烧钠，原本指望钠的两条黄色明线可以弥补太阳光谱中对应的D双线，但结果D线更黑了！

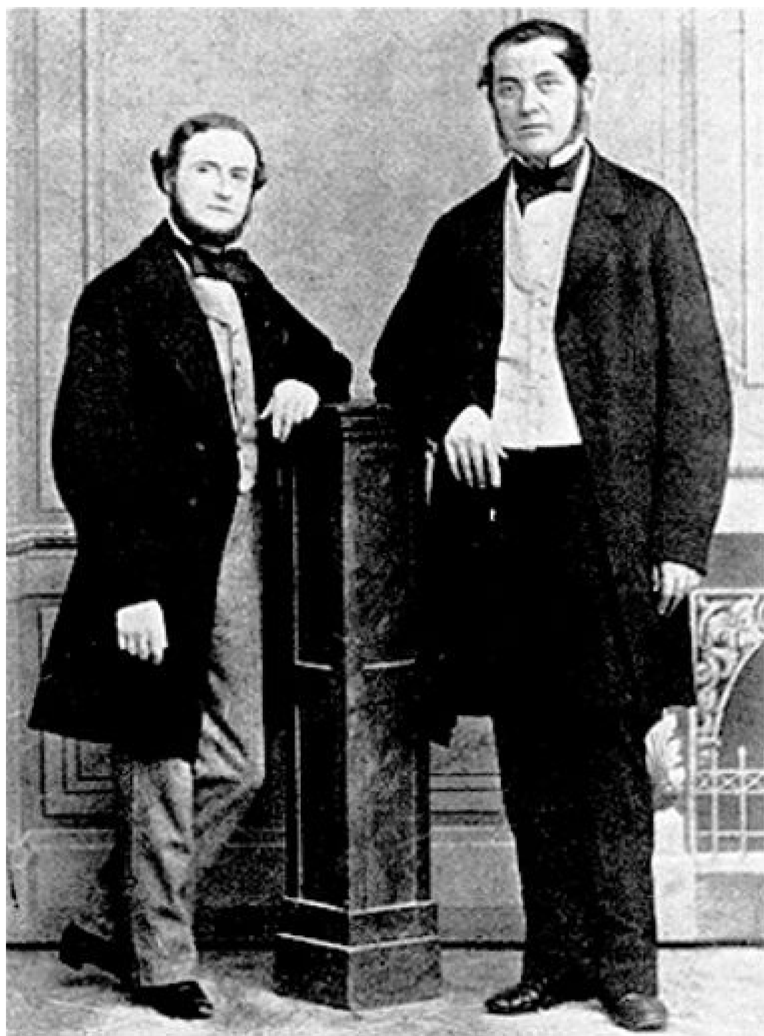


图8.3　基尔霍夫（左）和本生（右）。

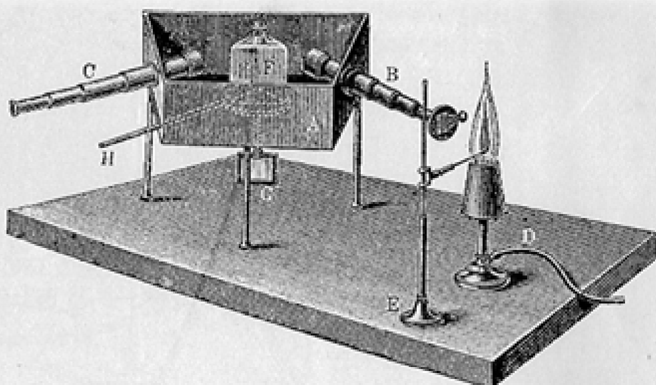


图8.4　基尔霍夫和本生使用的光谱分析术。

基尔霍夫又在实验室里用氢氧焰来点燃石灰棒来模拟产生连续光谱（不含明线），然后在燃烧的石灰棒与分光镜之间燃烧钠盐，这时分光镜中没有出现钠蒸气的明线光谱，而是出现了两条黑线，和太阳光谱中的D线位置完全一致。至此，基尔霍夫终于明白：太阳内部温度很高，发出连续光谱，太阳外围温度较低，这其中有什么元素，就会把连续光谱中相应的谱线吸收掉，产生吸收线。

1859年，基尔霍夫提出两条著名定律，也称基尔霍夫定律：1.每一种化学元素都有它自己的光谱；2.每一种元素都可以吸收它自己能够发射的谱线。后来基尔霍夫又补充了两点：炽热的固体或液体发射连续光谱；气体则发射不连续的明线光谱。运用这些发现，基尔霍夫和本生很快就证明了太阳上有氢、钠、铁、钙、镍等元素。

1868年8月18日印度发生日全食，法国天文学家詹森研究日珥光谱时发现一条橙黄色的明线，第二天他又把分光镜指向太阳边缘同一位置上，橙黄色明线依然可见。詹森写信向法国科学院报告他的发现。在该年10月底的同一天，法国科学院同时还收到了英国天文学家洛克耶报告的同样发现。

这橙黄线不在D线位置上。洛克耶进一步证实这条橙黄线并不对应于已知的任何元素。他认为这是太阳特有的一种元素产生的，他把它叫做“氦”（Helium），是来自太阳的意思。26年后英国化学家雷姆塞终于在地球上找到了这种元素。

1869年美国天文学家哈克内斯在太阳大气的最外层日冕的光谱中发现一条绿色谱线。第二年另一位美国天文学家杨测定了它的位置，发现这条谱线也不与地球上任何已知的元素相对应。人们设想这是一种只存在于日冕的元素所发出。问题的答案直到72年后的1941年由

瑞典分光学家埃德伦给出。这有赖于量子力学和恒星大气理论的发展。其实那不是一种日冕特有元素的产物，而是铁、镍、钙等元素9到14次电离的离子产生的禁线，这些谱线揭示了日冕中有高达百万度量级的电子温度。

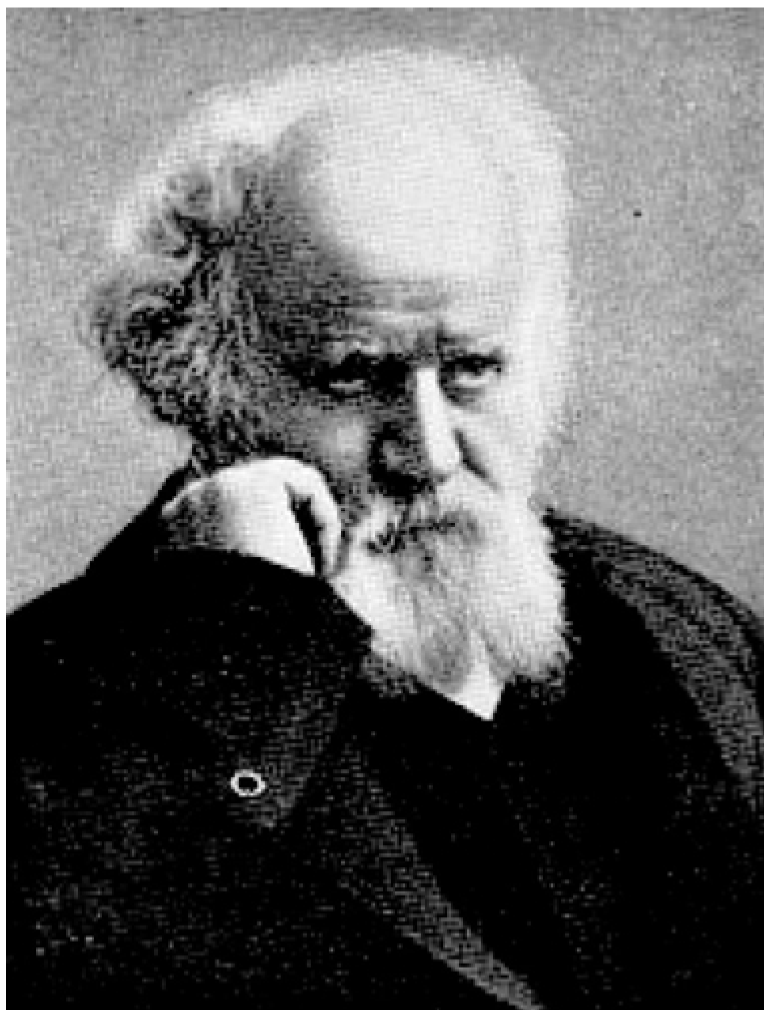




图8.5　詹森和洛克耶。

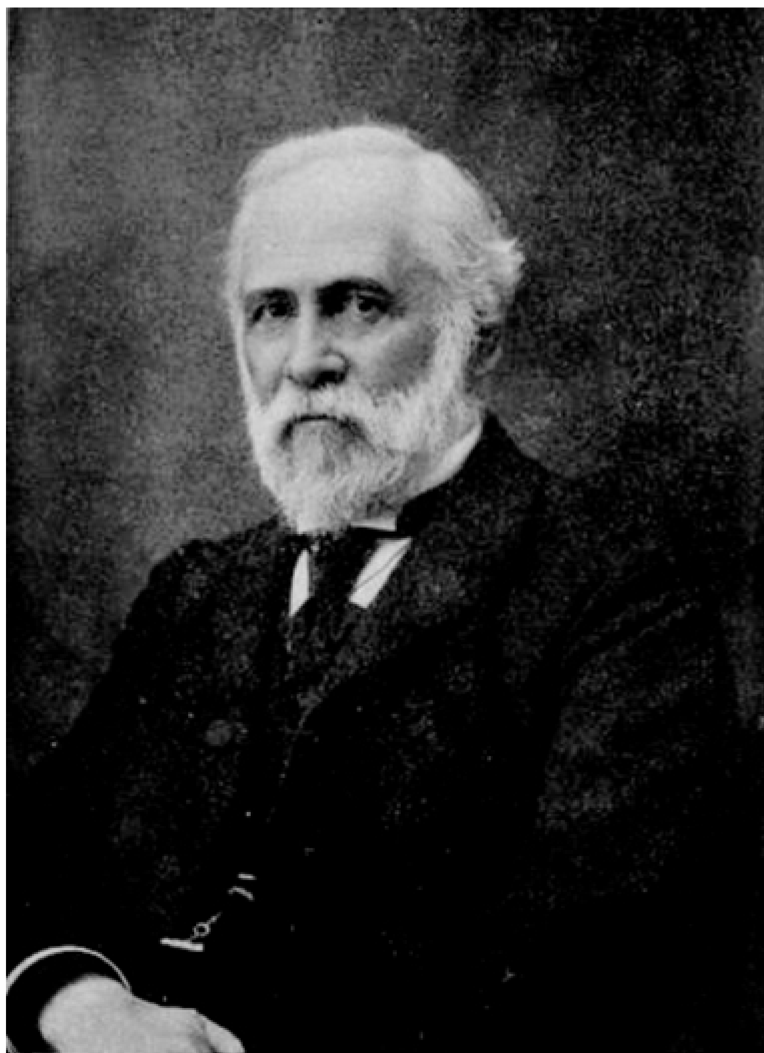
1870年杨还有一个重要发现。他在这年12月22日日全食的食既到生光的一瞬间，观测到太阳反变层的发射线光谱（即色球发射线光谱）—闪光谱，只延续一两秒钟，然后就被通常的夫琅和费光谱所代替，这一观测是基尔霍夫定律的直接证明。

照相术的发明是贡献给实测天文学的又一件利器。1839年阿拉果向法国议会推荐尼普斯和达盖尔发明的照相术时，像个先知一样预言：照相术将在天文学上做出伟大的贡献。

1840年美国化学家德雷珀用3英寸折射望远镜跟踪月亮曝光20分钟，得到第一张月亮照片。1845年法国物理学家斐索和傅科在巴黎天文台拍得第一张太阳照片。

哈佛天文台台长邦德在1849年用38厘米折射望远镜经20分钟曝

光，拍得一张像质极佳的月亮照片。1850年邦德与一名专业摄影家合作首次拍得一张恒星（织女星）照片。



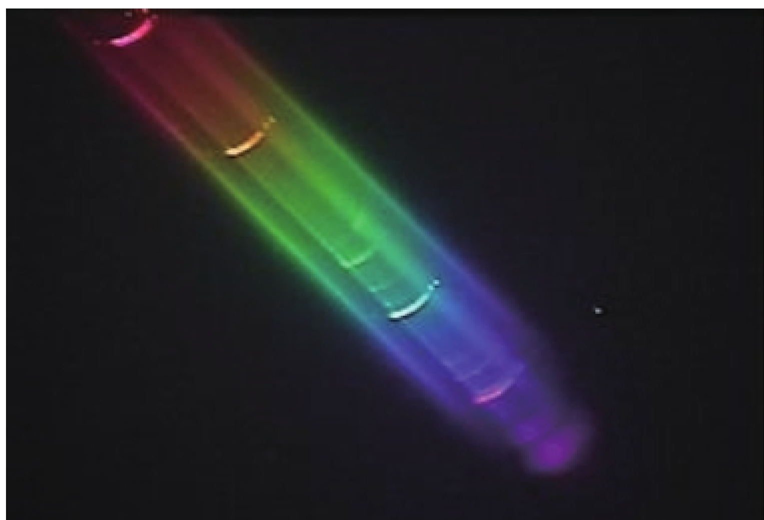


图8.6　查尔斯·杨和太阳闪光谱。

1851年英国摄影师阿切尔发明珂珞酊湿片法，使感光灵敏度比达盖尔照相术提高上百倍。珂珞酊湿片法的弱点是不利于拍摄暗弱的天体。因为较长的曝光时间会使得湿片逐渐干燥。

1871年英国化学家马多克斯发明“干版”法。到1880年，干版法灵敏度已经超过湿片法数十倍。从此暗弱的恒星照相变得可能。德国化学家福格尔又发明底片的敏化技术，可使底片的光谱响应扩展到光谱的长波部分，这使得拍摄恒星光谱变得可能。



图8.7　1852年2月26日约翰·惠普尔拍摄的月球照片。

1882年英国天文学家吉尔在好望角天文台成功拍摄了一颗彗星的照片，其中恒星的像也意外地清晰，这启发了他用照相方法编制星图。1885—1891年间他拍摄了几乎全部的南天星空。1886年起荷兰天文学家卡普坦花了10年时间归算了这些照片上的恒星位置。1896—1900年刊布了从 - 18°到南天极10等以上454875颗恒星位置。这是第一份南天照相星表《好望角照相巡天星表》。



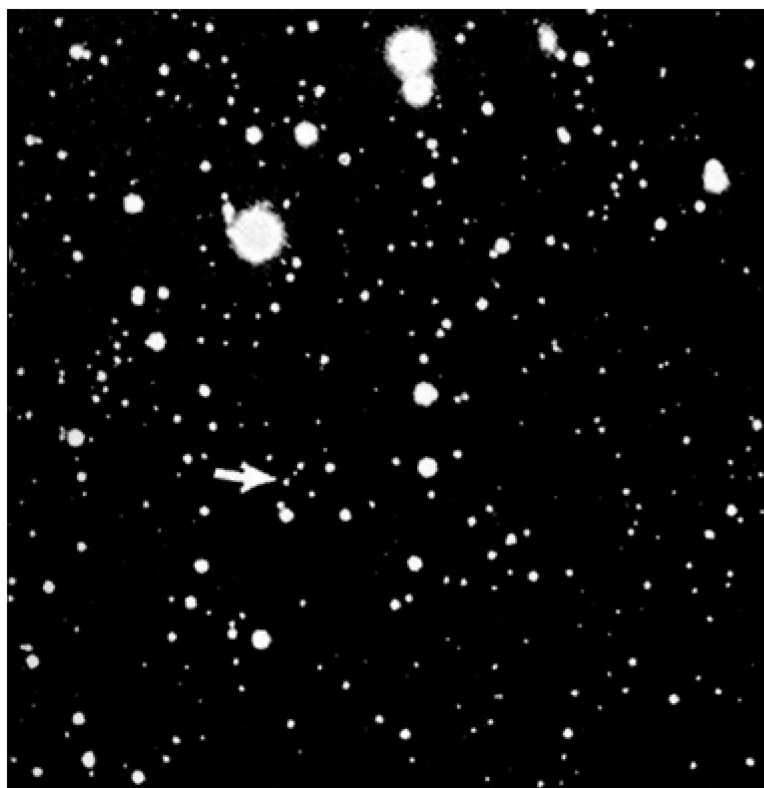


图8.8　吉尔和他拍摄的1882年大彗星照片。

法国天文学家亨利兄弟在巴黎天文台做了与吉尔类似的工作。1887年第一届国际天文照相会议在巴黎召开，会上作出编制一份规模庞大的国际天图和星表的决定。

与目视观测相比，照相方法具有客观性、文献性、积累性等优点，所以照相天文方法很快就显示出巨大的生命力。由于长时间曝光可以积累微弱的星光，所以照相术在发现暗弱天体方面也有得天独厚的优势。曾经被列为第九大行星的冥王星就是通过照相方法发现的。

洛韦尔相信美国人钱伯林和摩尔顿在1904年提出的星子假说。根据该假说，一颗路过的恒星从太阳拉出一团物质或者叫星子，所有行星就从这团物质形成而来。洛韦尔根据星子假说和太阳系已知所有天体的运行，算出了这颗尚未被发现的紧邻海王星的X行星的位置。洛韦尔和他的天文台为寻找这颗X行星付出很多努力。1916年洛韦尔去世之后还继续在寻找。最后，在1930年，这颗现在叫做冥王星的行星被该台的汤保找到了。但是需要指出的是，洛韦尔的预测在科学上是不正确的，只是机缘巧合帮助了冥王星的发现。



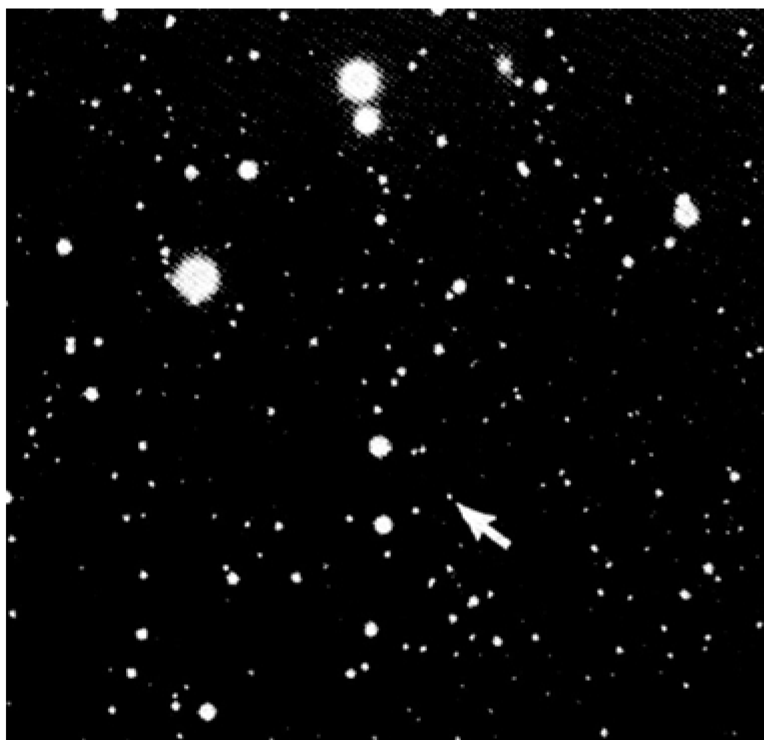


图8.9汤保发现冥王星的两张照相底片。1930年1月23日汤保拍摄了双子座天区（上），6天后拍摄了同一天区（下）。2月18日他用闪视镜比较两张底片时，注意到第二张底片上的一个天体（箭头所指）是从第一张底片上另一个位置（箭头所指）移动过来的。

测光术的发明使得恒星视光度的测定成为可能。1834—1838年间约翰·赫歇尔自制了一台量星计带到南非好望角，测定了一些恒星的视亮度。19世纪30年代，波恩天文台台长阿格兰德尔，用一架8.5厘米口径的折射望远镜测定恒星位置和视亮度，在25年内共测量了324198颗恒星，1863年刊布了《波恩巡天星表》，简称BD星表。继任者申费尔德测定了133000颗南天恒星，1886年发表《南半球巡天星表》，简称SD星表。

19世纪上半叶，德国生理学家费希内尔从约翰·赫歇尔等人的恒星测量中推出星等差一等的两颗星的光度接近一个不变的比值2.5，他由此得到一个著名的生理定律：“感觉度随刺激度的对数变化”。

1856年英国业余天文学家普森运用费希内尔的结论建立了光度与星等间的基本关系式即普森公式，建立了星等与光度之间的定量关系，为测光工作打下了基础。

1859年德国天文学家泽尔纳发明一种偏振光度计，并于1861年刊布了第一个光度星表，测定了3226颗亮星的星等值。美国哈佛大学天文台台长皮克林设计了另一种偏振光度计，称作哈佛子午光度计，于1879—1882年间完成了一个星数达4260颗的《哈佛光度星表》。1885年英国天文学家普里恰特首次使用“光劈光度计”测量恒星的光度，刊布了2784颗肉眼可见恒星的光度星表。

天空中许多恒星的亮度有微弱的变化，这就是变星。大多数变星的亮度变化肉眼难以分辨。而测光术的发展给变星的研究以有力的推动。

2.恒星分光观测和光谱分类

1863年意大利天文学家塞奇开始用底色散分光镜观测大量恒星，以进行光谱分类。1868年塞奇刊布一个包含4000颗恒星的表，把恒星光谱分为四类：（1）白色星，如天狼星、织女星等，光谱中只有几条氢的吸收线；（2）黄色星，如五车二、大角等，光谱与太阳的相同；（3）橙色和红色星，如参宿四、心宿二等，光谱里有明暗相间的光带；（4）暗红色的星。

塞奇猜测这不同类型的恒星具有不同的温度。

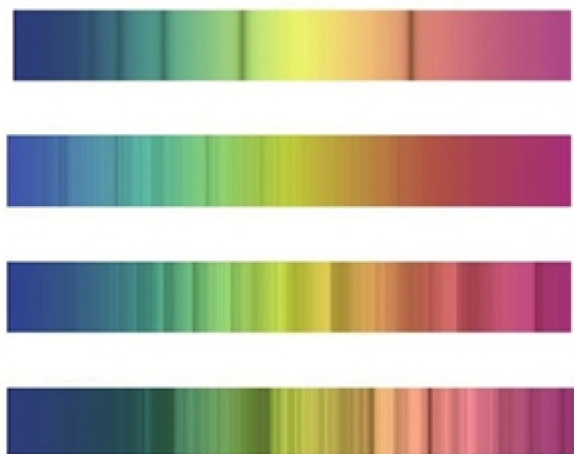


图8.10　塞奇的恒星光谱型分类

1864年英国天文学家哈根斯用高色散分光镜研究少数亮星的光谱。到1865年，哈根斯已经在参宿四、毕宿五等恒星的光谱里认出了钠、铁、钙、镁、铋等元素的谱线。哈根斯还研究了星云、彗星的光谱。

他观测了1866年、1867年和1868年三颗彗星的光谱后发现彗星光谱中有碳氢化合物的谱带。这是在地球之外首次发现有机分子的证据。

1842年奥地利物理学家多普勒提出声源与观测者有相对运动时，观测者所测得的声源波长会发生变化。多普勒认为，运动的光源的颜色也有类似的变化。1848年法国物理学家斐索指出光速如此之大，光源运动速度显得微不足道，因此很难发现光源的颜色变化。他建议可

以改而观测光源谱线的位移。

1868年哈根斯首次尝试用多普勒谱线位移测定了天狼星的视向速度，但这种测量很困难。光谱片因自身的重量、室内温度降低而收缩会导致谱线的微小位移，几千分之一毫米的误差会造成每秒几公里的误差。

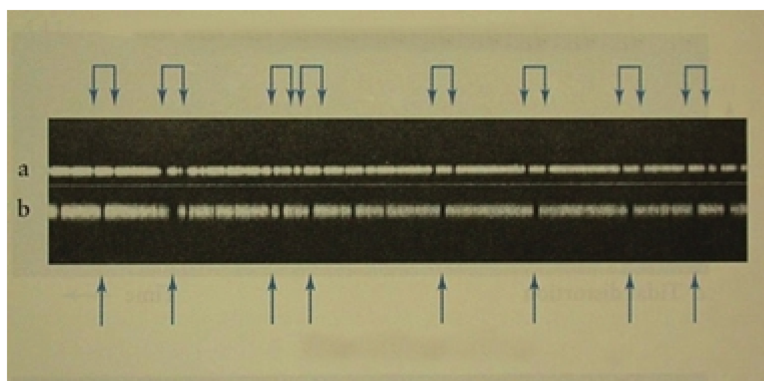


图8.11　分光双星谱线的多普勒位移。

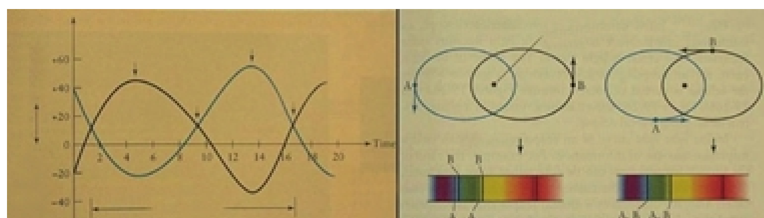


图8.12在特殊情形下，密近双星相互绕转的轨道面与我们观测它们的方向平行，这样在地球上看去一颗恒星会周期性地掩食另一颗恒星。这种双星叫做“食双星”，因为只能用分光方法才能发现它们，所以又叫做分光双星。对这些分光双星的亮度和光谱变化进行仔细分析，能够得出这些恒星的大小、温度、间距和质量等信息，而通过其他方法无法获得这些信息。

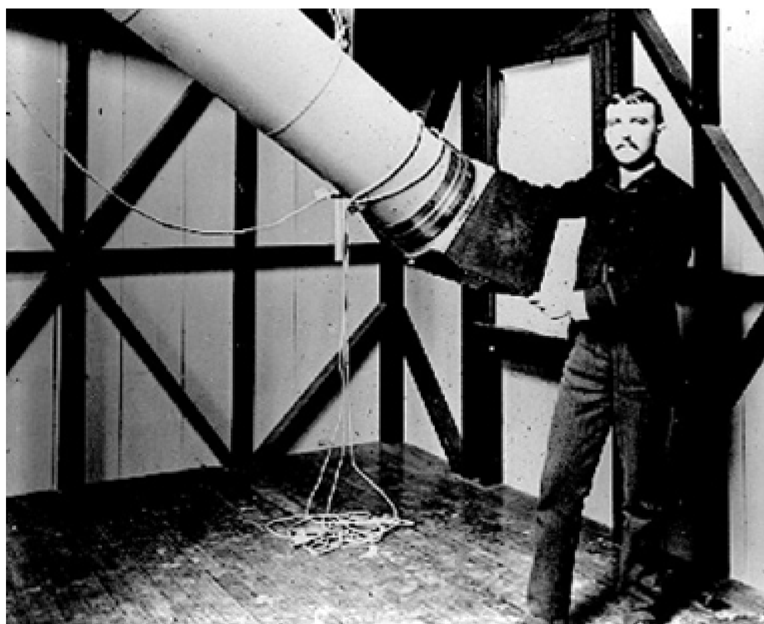


图8.13　亨利·德雷珀和他的望远镜。

开阳（大熊ζ星）和辅是一对目视双星。开阳本身又是一对用望远镜可以分辨开的物理双星。1889年美国女天文学家莫里发现开阳A星的谱线往往分成两条，它们时而分开，时而靠拢、交迭。根据多普勒效应，只能用两颗恒星互相绕转来解释这个现象。

1872年美国天文学家亨利·德雷珀用71厘米反射镜和湿片法拍到带四条氢线的织女星光谱。

1886年皮克林采用物端棱镜的方法来拍摄许多恒星的低色散光谱，以进行恒星的光谱分类。到1889年止，皮克林对北半天球完成了一次完整的光谱巡天，后又在秘鲁建立天文台，进行南半天球光谱巡天，最后完成了25万颗恒星的物端棱镜光谱工作。

对于塞奇的四种类型，德雷珀曾代之于16种，用A、B、C……等字母来标记。随着对恒星的更好了解，这些原先表示各种各样的光谱线外观的字母，被重新安排成大致按照恒星表面温度的降序排列，并稍作了简化。光谱型分类的最后次序是O、B、A、F、G、K、M、R、N、S。如果对光谱的描述足够细微，可以对某些分类按照数字进一步细分。这样，例如太阳，就成了一颗G2光谱型的恒星。这就是哈佛分类。

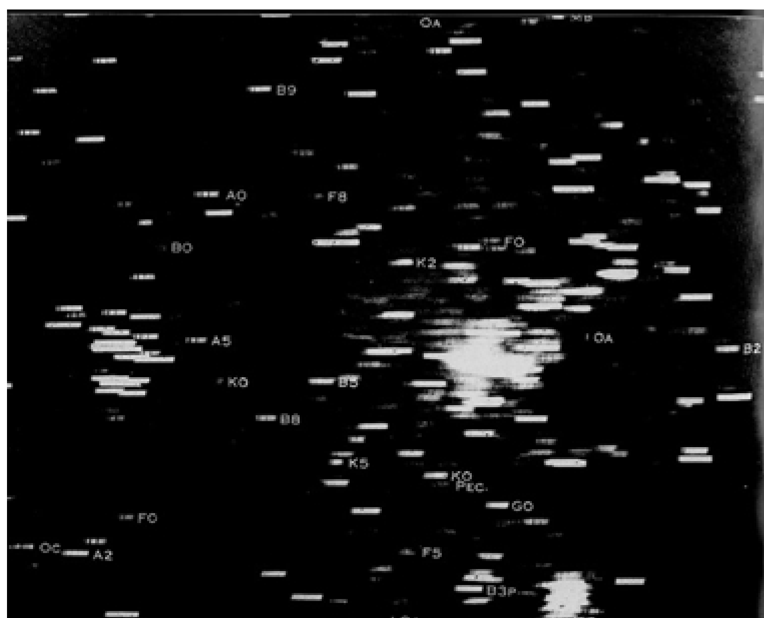


图8.14　皮克林的恒星低色散光谱底片（船底座η星附近天区）。



图8.15　女天文学家们在工作，左侧站立者为皮克林。

1918年到1924年（后来有所扩充）间，包含了大约225000颗恒星的光谱型和亮度资料的亨利·德雷珀星表（HD星表）出版，这是“恒

星光谱领域里的一项伟大工作”。其中以美国女天文学家坎农为首的一群女天文学家为这些恒星的光谱分类作出了巨大贡献。

3.赫罗图

大约到1910年，大量恒星的两项独立信息已经获得：（1）光谱型或者恒星的表面温度；（2）恒星的距离或绝对星等。问题是：一颗具有特殊绝对星等的恒星能够属于任何一种光谱型或者具有任意的表面温度吗？或者宇宙中只允许出现这些量的某些组合吗？换一句话说，如果把每一颗恒星的绝对星等值相对于光谱型作图，这些点会散布在整个图上，还是只处在某些区域？

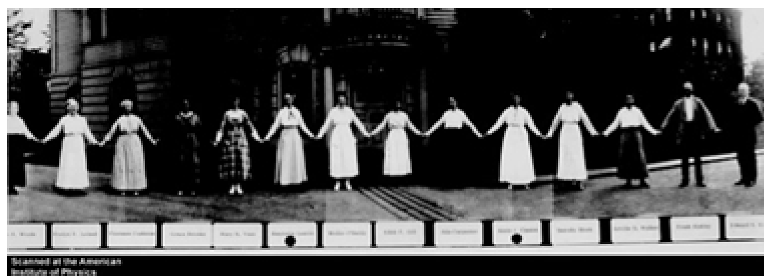


图8.16　皮克林和他的团队在哈佛大学天文台楼前手拉手拍照。



图8.17　皮克林和他的女同事们在哈佛大学天文台C楼前合影，

摄于1913年5月13日。

皮克林组织的十多位妇女对恒星光谱进行大规模的研究，她们中的一些人后来成为杰出的天文学家，莫里就是其中一位。莫里对恒星光谱提出了十分细致的分类，成为后来二元光谱分类的先驱，但皮克林等对此不感兴趣，认为这种分类超出了当时他们拍摄恒星所用的物端棱镜的分辨极限，且过于烦琐。当时采用了坎农的分类，即哈佛分类。

1892到1898年间，爱尔兰业余天文学家蒙克开创了对恒星光谱型和自行关系的探讨，他把恒星分成天狼星型蓝星、五车二型黄星、大角型红星三大类，然后统计当时发表的恒星星表中的星数和自行数据，得出结论：五车二型黄星比大角型红星具有更大的平均自行。

丹麦天文学家赫兹普隆受莫里和蒙克工作的启发，致力于研究恒星光谱型与自行的关系。他认为蒙克的光谱型分类过粗，又把不同视亮度的恒星放在一起统计。赫兹普隆决定用莫里的分类分门别类地统计恒星的自行，又把恒星的自行归算到视星等为0等时的自行值。



图8.18　赫兹普隆肖像。

1905到1907年间赫兹普隆得到一项十分重要的发现：在莫里光谱型的同一型中，谱线较窄的恒星比其他恒星的平均自行小很多，即它们有特别大的光度。赫兹普隆把这类光度很大的恒星叫做巨星，其他光度较小的叫做矮星。巨星数目比矮星数目少得多。赫兹普隆还首次巧妙地利用星团成员星来统计它们的光谱型与星等的关系，从而避开了视差的测量，用视星等代替绝对星等。1911年赫兹普隆发表了昴星团与毕星团的色星等图，成为后来赫罗图的前身。

1902到1905年间罗素在英国剑桥大学天文台用照相方法测定恒星的视差。恒星视差一旦确定，就可以从它们的视亮度推算出它们的光度。1910年罗素发表《恒星视差的测度》的论文，公布了50多颗恒星的视差，并作了恒星光谱型与光度关系的讨论，他也得到存在着高光度的巨星与低光度的矮星这两类恒星的结论。

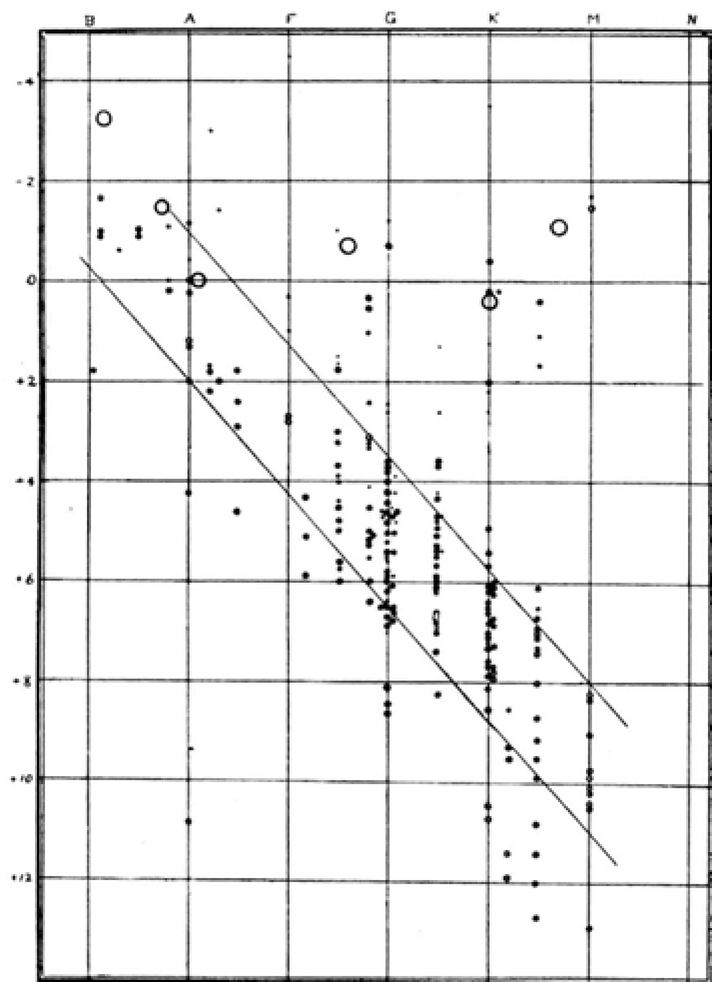


图8.19　罗素图

1913年6月13日和12月30日，罗素相继在英国皇家学会和美国天文学会上介绍了他的工作，引起天文界的极大关注，不久这种图被叫做罗素图。其实罗素的部分工作被赫兹普隆领先了一两年。1933年之后由于北欧天文学家对赫兹普隆工作的宣传，该图改称为赫罗图。

随着观测精度的提高，赫罗图反映的恒星特征得到了证实，并认识了更多其他特征。1914年亚当斯和赫尔斯朱特在威尔逊山天文台作出一项重要发现：同一种光谱型的主序星和巨支星的光谱之间有细微的差异，这种差异表现在特殊的谱线对的相对强度上。

这样，通过仔细研究一颗恒星的光谱，能够确认这颗恒星属于标准赫罗图的哪一部分，读出它的绝对星等，然后从观测知道它的视星等，从而确定它的距离。

随着20世纪30年代摩根（W.W.Morgan）和他的合作者们在叶凯士天文台仔细地把哈佛光谱分类方案精致化，这种利用赫罗图从恒星的光谱型和视星等来确定恒星距离（分光视差）的方法，成了确定那些遥远的用三角学方法无法获得的恒星距离的有力工具。

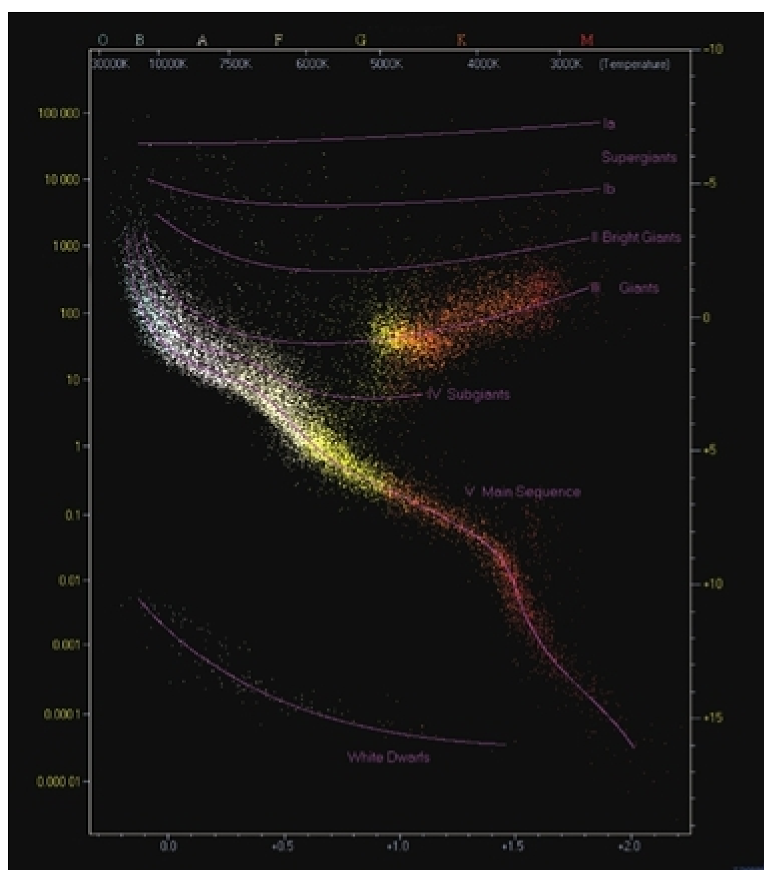


图8.20　一种更为现代形式的赫罗图。

4.单颗恒星的物理学

对于单颗恒星，有两个最基本的参数很难获得，那就是它的大小和质量。利用来自密近分光双星的宝贵信息，可以获得少数恒星的质量和大小。然而，就这少数恒星而言，它们彼此之间的质量差异就已大得令人吃惊。

1924年，剑桥的爱丁顿利用收集到的信息，发现恒星质量可以小到五分之一太阳质量，大到25倍太阳质量。更为重要的是，他令人信服地指出，这些恒星的质量与它们的绝对星等之间有非常紧密的关系，即存在着一种所谓的质光关系。



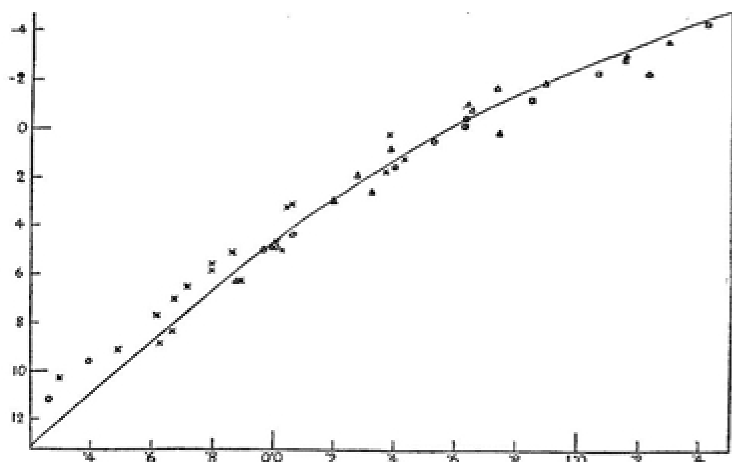
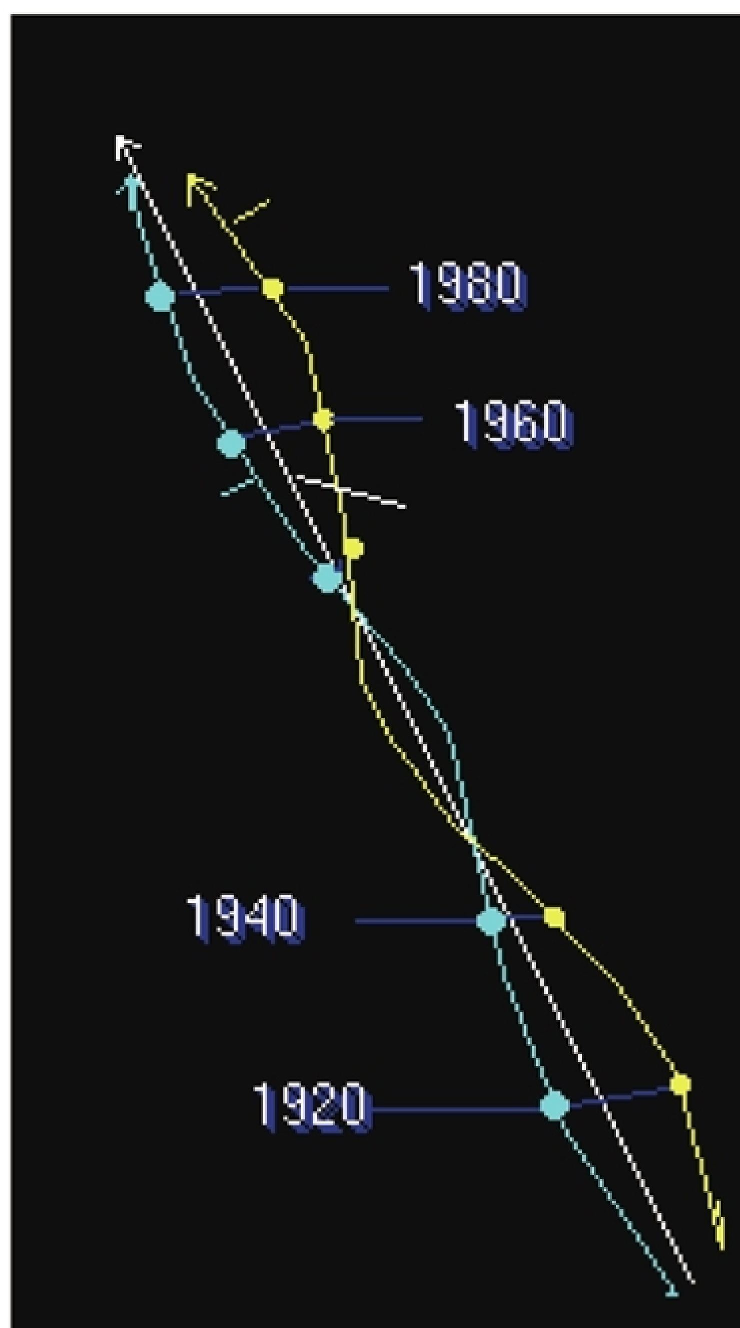


图8.21爱丁顿和他的质光关系（纵坐标为绝对星等，横坐标为以太阳质量为单位的恒星质量对数）：大质量的恒星有大的光度，25倍太阳质量的恒星发射出的能量是太阳的4000倍。

在赫罗图中，大部分恒星落在两个主要的星序上。但是就是在罗素作的第一幅绝对星等对光谱型的图中，在图的左下角有一颗本身很暗的A型星。这是波江座一对近双星中那颗较暗的伴星。处在赫罗图上这个位置的恒星叫做白矮星。

天狼星离开太阳大概9光年远，它有相当大的自行。1844年贝塞尔指出天狼星沿着波浪型的曲线前进。对这一现象最简单的解释是，天狼星带有一颗很暗弱的伴星。20来年后，美国望远镜制造者克拉克在测试一架新的折射望远镜时，第一次看到了天狼星的这颗暗伴星。观测和推算表明天狼星伴星也是一颗白矮星，每50年绕天狼星一周。作为双星系统的成员，这颗伴星的质量、大小等能很快被确定。

计算结果表明白矮星是一些“荒谬”的恒星：质量与太阳质量差不多，但大小（从它们的表面温度和测得的亮度推算出）不比地球大多少。这意味着它们有巨大的密度，正如爱丁顿所说的，一吨物质能够装进一个火柴盒里。


1980
1960
1940
1920

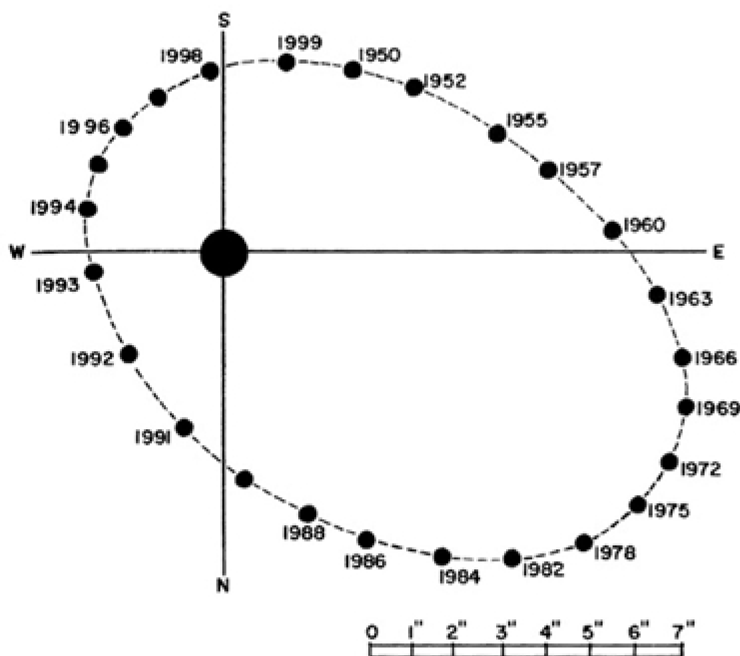


图8.22 天狼星及其暗伴星的视运动（上）和轨道运动（下）。

对白矮星的解释将再一次等待对原子核物理学和恒星内部结构的更好掌握。剑桥大学的福勒在1926年用量子物理学理论解释了所谓的高密度简并物质的存在。

这种所谓的“电子简并态”由电子之间的不相容原理排斥力来抗衡引力而维持平衡。在巨大的压力下，电子脱离原子核，成为自由电子。这种自由电子气体将尽可能地占据原子核之间的空隙，从而使单位空间内包含的物质也将大大增多，因此密度大大提高。

1931年，印度数学家钱德拉塞卡首次计算了这类白矮星质量的上限为1.44倍太阳质量。这个质量现在称为钱德拉塞卡极限。质量大于钱德拉塞卡极限的恒星，将坍缩成一种密度极大的状态，甚至一个点。爱丁顿对此结论极为反感，说自然的行事不会如此荒谬。爱因斯坦也写了一篇论文，宣布恒星的体积不会收缩为零。



图8.23　福勒。

1939年奥本海默从广义相对论出发，论证了质量大于钱德拉塞卡极限的恒星会坍缩成一个看不见的天体，但是由于“二战”的干扰，引力坍缩问题几乎被人遗忘。直到20世纪60年代，实测技术的提高激起人们对宇宙大尺度问题的兴趣，黑洞和大爆炸理论成为热门的话题。霍金成为这方面研究的先驱者之一。



图8.24　钱德拉塞卡。

白矮星是对天体的观测先于认识的一个例子。第一颗白矮星发现于19世纪，20世纪早期的观测揭示它们有难以置信的高密度，它要求新的关于物质状态的物理学理论来揭示它们，来确认观测是正确的，并正确地解释观测。

但也有例子说明理论有时也可以先于实测而出现。1932年查德威克在实验室里证实了原子结构中一种新的基本粒子—中子。当时加利福尼亚的瑞士裔天文学家兹维基和他的德国合作者巴德提出，中子的已知属性允许一种理论上存在的恒星，它们由中子构成，密度甚至是白矮星密度的数百万倍。这一推测发表于1934年，在当时引起很少的注意。直到1967年，在射电天文学研究中偶然发现这样的天体确实存在。

在19世纪60年代恒星分类刚开始时，人们就认识到分类一定包含了恒星如何形成和如何从它们的初始状态演化过来的信息。当时认为恒星能量来源于开尔文—赫姆霍兹收缩，而且不知道恒星的大小和质量，不知道为什么恒星有差别这么大的光谱型，所以早期试图了解恒星生命历史的尝试只能是猜测而不能走得更远。

赫兹普隆和罗素都很快看到赫罗图所表明的巨星和矮星之间的区

别，从中看到了恒星演化的新线索。在1914年一篇半普及的文章中，罗素等人接受了恒星的能量来自收缩的说法，所以恒星演化朝着密度增加和体积减小的方向进行。恒星形成时是光谱型为M的红巨星，然后逆着光谱型的次序沿着巨星序朝温度增加方向移动到A型或B型，然后沿着主星序向下，顺着光谱型的次序，到达冷的M型矮星。他还假定恒星的质量越大，进入主星序上的位置就越高。足够大质量的恒星能够到达主星序上B、A等谱型，质量较小的巨星只能到达主星序上的F甚至G谱型。

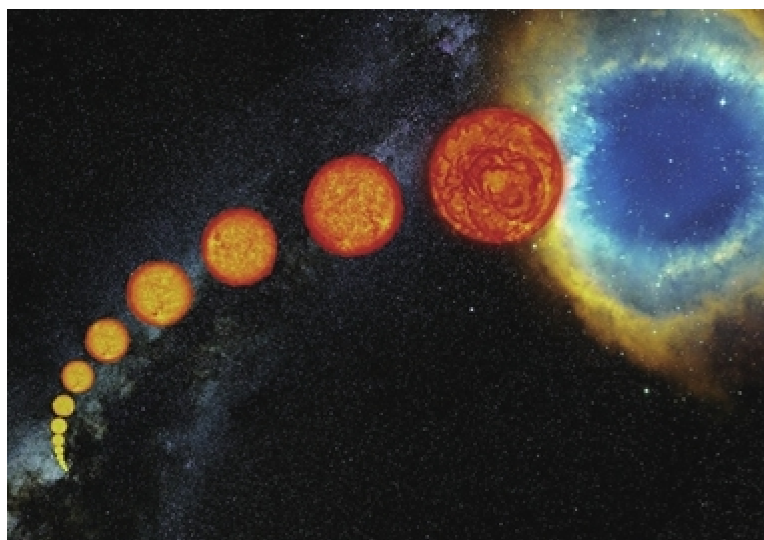


图8.25一颗类太阳恒星演化过程的艺术想象图。恒星从左下的主序星慢慢膨胀为一颗亚巨星、巨星，最后爆炸成行星状星云。作者：ESO/S.Steinh.fel。

但是当一些有关恒星大气、恒星结构和质光关系的新观点出现时，罗素的理论在10年之内就步入了困境。罗素认为主星序是恒星演化的途径。爱丁顿的质光关系说明主星序上不同位置的恒星具有截然不同的质量，如果恒星真的沿着主星序向下演化，那么它的质量的大大损耗就无法加以解释。

1926年罗素提出了一个不同的理论，包含了一个关键的新想法：恒星的寿命取决于它的初始质量，这一质量在恒星的演化过程中基本上不变，而恒星并不是被迫沿着巨星序和主星序移动，而是能够穿越它们。

巨星序和主星序只是恒星保持稳定的结构从而度过生命中有意义阶段的停留之处，它不是演化过程而是一系列表示平衡状态的位置。赫罗图的一些区域没有恒星，只不过意味着恒星非常快速地度过这种

光谱型和亮度的组合，因此在任一时刻，极大多数恒星处在赫罗图中的巨星序和主星序区域。在这些位置上，恒星度过了它一生中大部分时间。

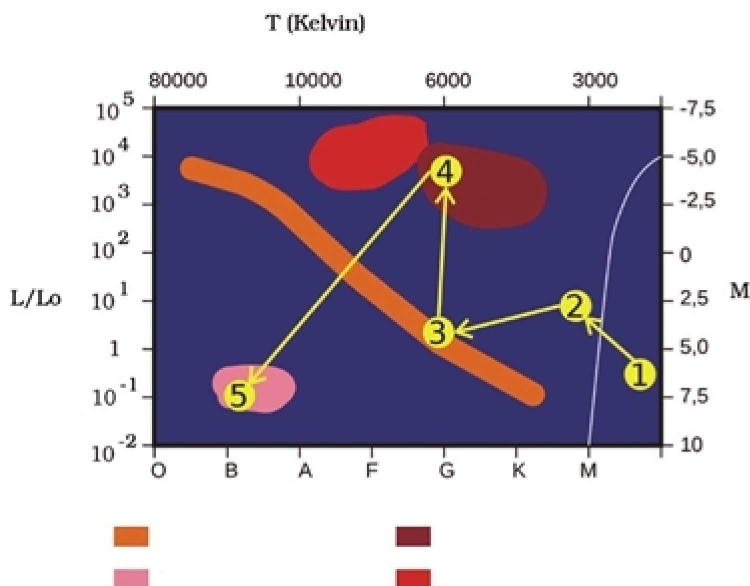


图8.26根据赫罗图的框架，大部分恒星的生命历史可以总结为五个阶段：（1）起初是一团星际尘埃；（2）从气体浓缩成原恒星；（3）形成稳定的结构，进入主星序。恒星质量越大，亮度也越大，它的光谱型也越早（譬如说是F型而不是M型）。恒星在它的稳定结构上度过大部分时间，通过在内核从氢转化为氦而释放能量；恒星质量越大，演化就越快；（4）当内核的氢耗尽时，恒星很快地“移”到赫罗图上的巨星支，那时恒星的能量由氦核进一步转化成更重的元素来提供；（5）最后当恒星能源全部耗尽时，外壳散成星际物质，它的轨迹穿越赫罗图的主星序，到达左下方，坍缩成白矮星。

对于质量很小，也许只有十分之一太阳质量的恒星，演化的过程进展得很缓慢，以致于即便是最老的恒星也还只处在第一阶段。另外一方面，质量最大的恒星以非常快的速度演化，它们的整个生命只有几百万年而不是几十亿年，它们在最后坍缩阶段的标志是发生超新星爆发、形成中子星这样的奇异天体。

第九章 从银河系到河外星系

18世纪上半叶以前，人类对宇宙的认识基本上还局限于太阳系范围。然而既然已经知道恒星也是与太阳相仿的天体，那么这无数的恒星之间又有什么内在联系？它们是否组成一个更大的天体系统？

1.威廉·赫歇尔的“银河系”和“星云天文学”

首先在观测基础上推断恒星的空间结构的是英国天文学家威廉·赫歇尔。赫歇尔相信存在更大的恒星空间结构。

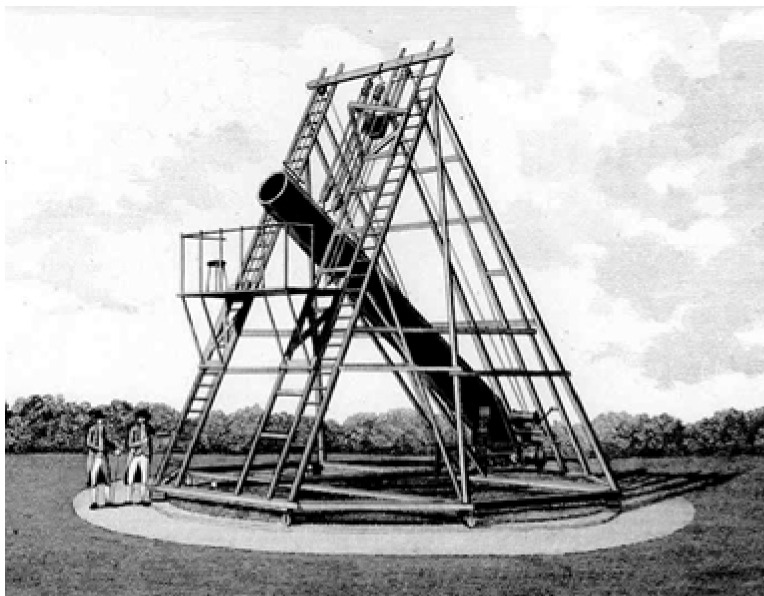


图9.1　赫歇尔的46厘米口径、6米焦距反射望远镜。

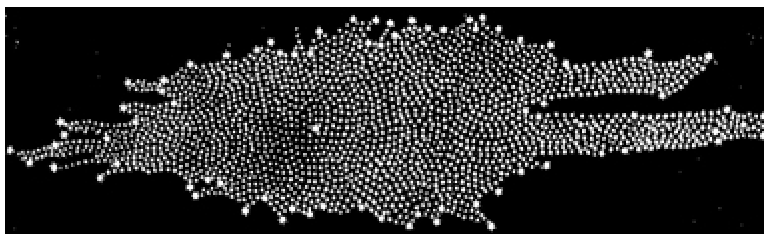


图9.2　赫歇尔的银河系结构

他用自制的46厘米口径、6米焦距的反射望远镜，选定他所在地理纬度所见天空中683个取样天区，通过1083次观测，数了117600颗恒星，确定了各天区亮星与暗星的比例。

赫歇尔先设定了4条工作假设：（1）宇宙空间是完全透明的；

（2）他的望远镜能看到银河系的最外沿；（3）恒星的空间分布是均匀的，某一天区的恒星密集就表明这个方向上恒星延伸得越远；（4）所有恒星的亮度是一样的，恒星视亮度的不同只是由于距离远近造成的。现在看来，赫歇尔的这四条工作假设都是有问题的。由于星际削光的存在，宇宙空间并不是完全透明的。他的望远镜也远未达到看到银河系最外沿的能力。恒星在空间的分布也不是完全均匀的。恒星本身的亮度差别也很大。



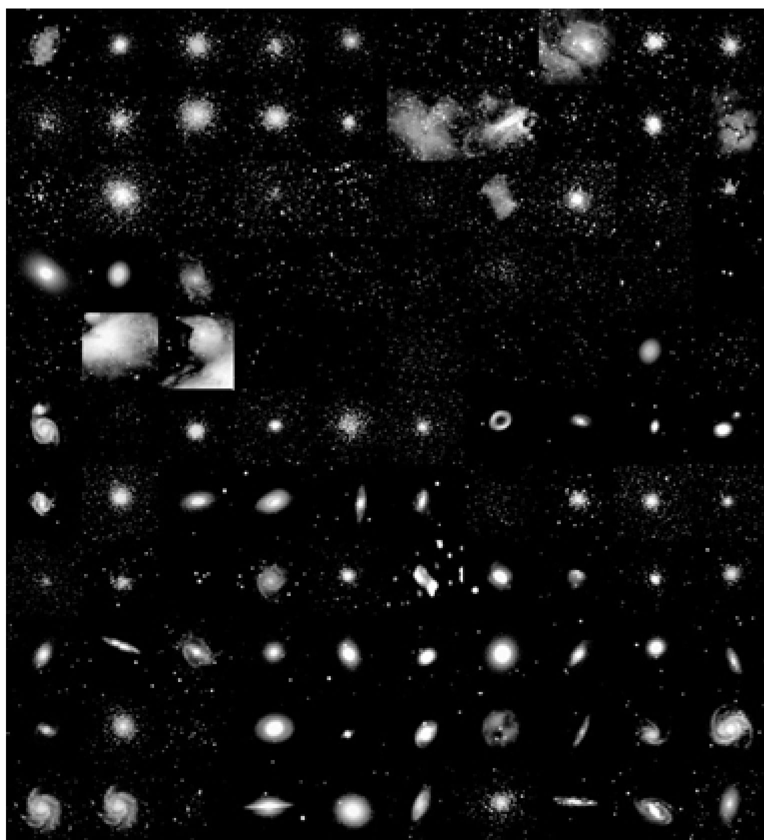


图9.3　梅西耶和梅西耶天体。

在上述工作假设基础上，赫歇尔分析了他的观测资料，获得了第一幅银河系的结构图，并得出关于银河系的4点结论：（1）存在更大的天体系统银河系；（2）银河系直径大约是其厚度的5倍；（3）以一等星的平均距离为单位，银河系的直径约950单位，厚约150单位；（4）太阳位于银河系的中心。这些结论除了第一条本身就是赫歇尔的信念之外，其他三条都是有问题或者错误的。赫歇尔本人后来经过更多的观测，也意识到自己的那些假定过于粗略了。

赫歇尔还相信存在着跟银河系一样的河外星系。天空中有一些有别于恒星那样的点光源的“云雾状天体”，这些可能是星云、球状星团和少数疏散星团，还可能是远离近日点的彗星。18世纪下半叶，彗星猎手梅西耶把他观测到的固定的云雾状天体记录了下来，以便搜索彗星时加以区别。1781年他把103个云雾状天体编成星表(其友后增补7个)，这就是著名的梅西耶星表（M星表）。

赫歇尔一看到梅西耶星表之后，立刻用他当时最好的望远镜对星

表中29个梅西耶称之为“无星的星云”的天体进行了观测，发现它们中的极大多数都分解成一个个暗弱恒星的集合体。因此威廉·赫歇尔断言，“星云”就是星系。赫歇尔的观测结果大大鼓励了河外星系存在的推测。但实际上他的29个观测对象中18个是球状星团，6个是疏散星团，5个是“星云”，他的望远镜分辨率还远远不足于分解“河外星系”。

赫歇尔对银河系和河外星系的探索，从结果上看也许未尽如人意，但他用恒星计数来研究恒星空间结构，用统计恒星自行来研究太阳本动，以及对双星、星团、星云等天体所作的大量观测，开创了恒星天文学这一分支，被后人尊为“恒星天文学之父”，也是当之无愧的。



图9.4作为威廉·赫歇尔的独生子，约翰·赫歇尔自己热衷的专业是数学。他1809年进剑桥圣约翰学院学习，是英国数学改革活动的领袖

人物，年仅21岁就被选进皇家学会。约翰·赫歇尔离开剑桥时写道："我的心已经死亡。"但一旦他投入了父亲的事业，却看到自己被赋予了神圣的使命：完成他父亲的工作，使其更加完善。他是他那个时代的科学名人，据说给他写信，地址只要写成：英国伦敦约翰·赫歇尔收。他的著作《天文学纲要》经李善兰和伟烈亚力合译成《谈天》，成为中国近代天文学史上的一部重要作品。

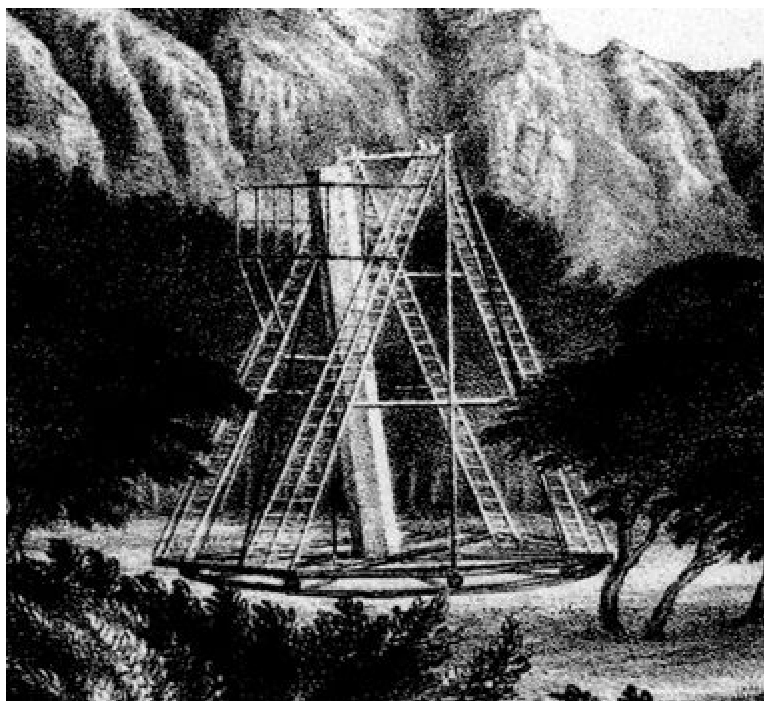


图9.5　约翰·赫歇尔的望远镜。

1816年78岁的赫歇尔把在剑桥教书的儿子约翰·赫歇尔叫回家，以便把自己制作望远镜和进行天文观测的本领传授给他，免得后继无人。

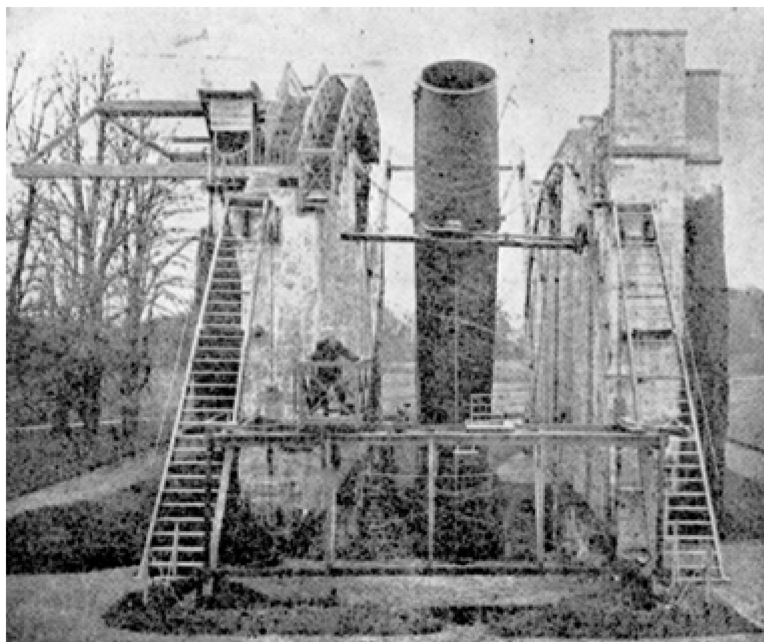


图9.7　19世纪最大的望远镜，罗斯勋爵的Leviathan of Parsonstown。

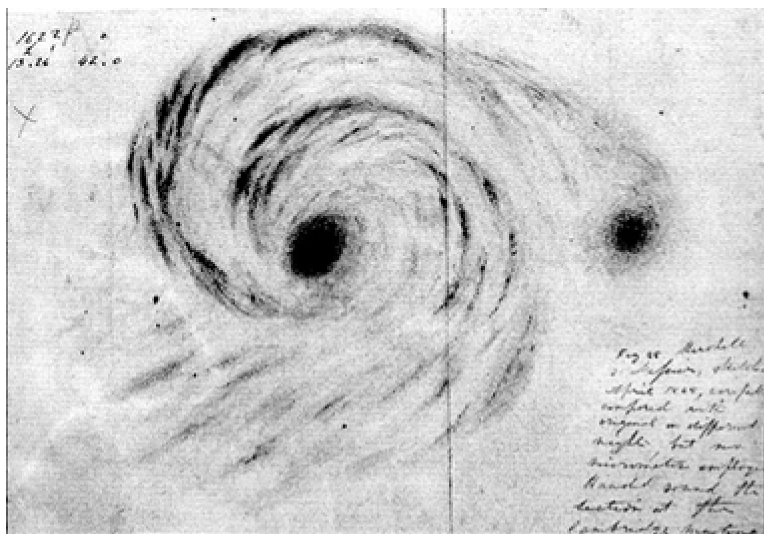


图9.8　罗斯勋爵的M51草图。

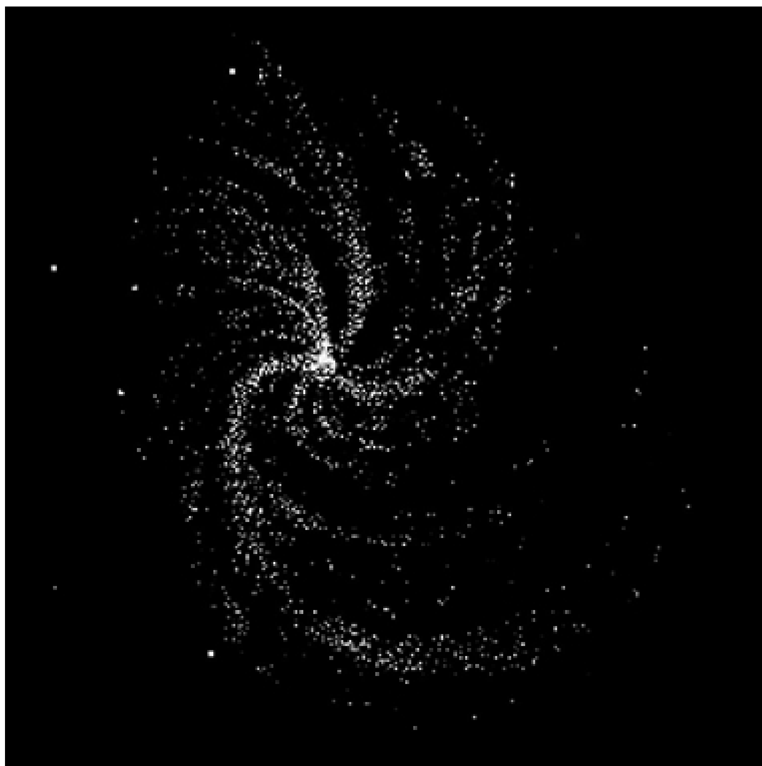


图9.9　罗斯勋爵的后发座M99草图。

1820年约翰·赫歇尔在其82岁老父的指导下重新抛光了6米焦距、45厘米口径的望远镜。约翰·赫歇尔利用这架望远镜对他父亲所发现的星云作了彻底的复查，在1833年发表了一个包含2306个星云、星团的表，并使星云研究成为天文学主流的一部分。

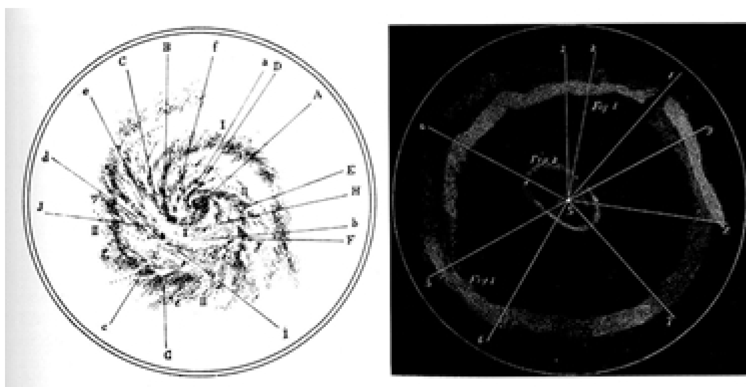


图9.10银河系的透视特征。上右：普罗克特的银河系主要特征草

图和解释银河系显示出这样的结构的原因。上左：伊斯顿1900年绘画局部，解释银河系的各种观测特征将如何形成。

从1834年到1838年约翰·赫歇尔在好望角对南天星空做了观测。在那里他又发现了数百个云雾状天体。他仔细观测了大、小麦哲伦云，在大麦哲伦云中数出919个天体，在小麦哲伦云中数出244个天体。1847年他发表了含有2100多对双星和1700多个星云、星团的《1834到1838年间好望角天文观测结果：用望远镜完成了对整个可见星空的观测，始于1825年》。

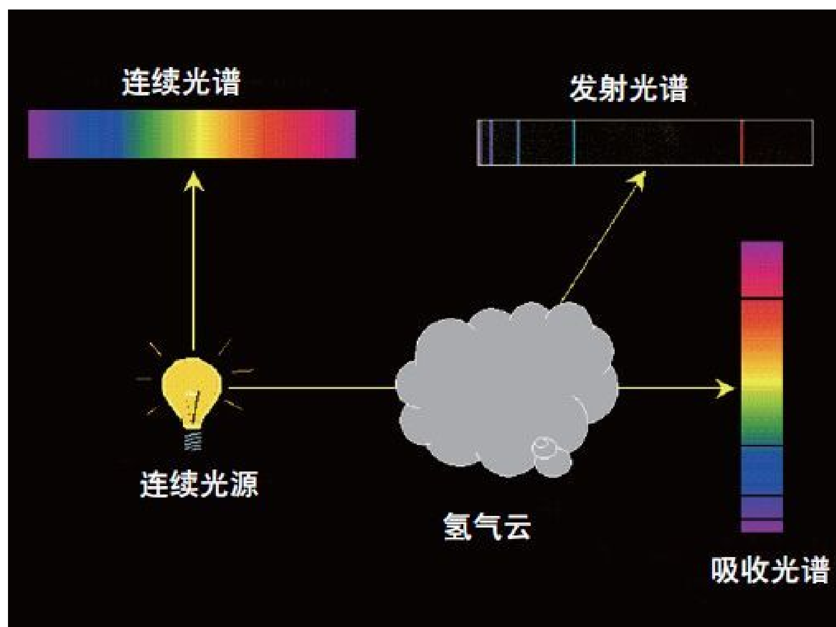


图9.11　天体光谱呈现何种谱线的示意图。

从好望角回来之后，他基本上放弃了实测工作，但仍然于1864年出版了一部包含了5079个星云和星团的总表。他的这个表是现在天文学家所用的《星云星团新总表》（NGC）的先驱。

2.星云的漩涡结构和分光观测

人称罗斯勋爵的英国天文学家威廉姆·帕森斯用1845年建成的当时世界上最大的反射望远镜分解了威廉·赫歇尔未能分解的云雾状天体，实际上他分解的大多是球状星团，但在当时无疑是对“星云都是岛宇宙”这一说法的重要支持。罗斯还发现有些云雾状天体（如M51，猎犬座星云）有漩涡结构，1848年他又辨认出M99的漩涡结构。

那么银河系本身是否也是个漩涡呢？

1852年亚力山大教授发表了一篇《银河系：一个漩涡》的讨论。亚力山大认为，如果太阳和其他亮星构成类似一个漩涡星系的中央星团，而又合适地选择四个分支的轨迹，那么太阳系的居民将看到一个与我们在地球上确实已经看到的非常相近的夜空。



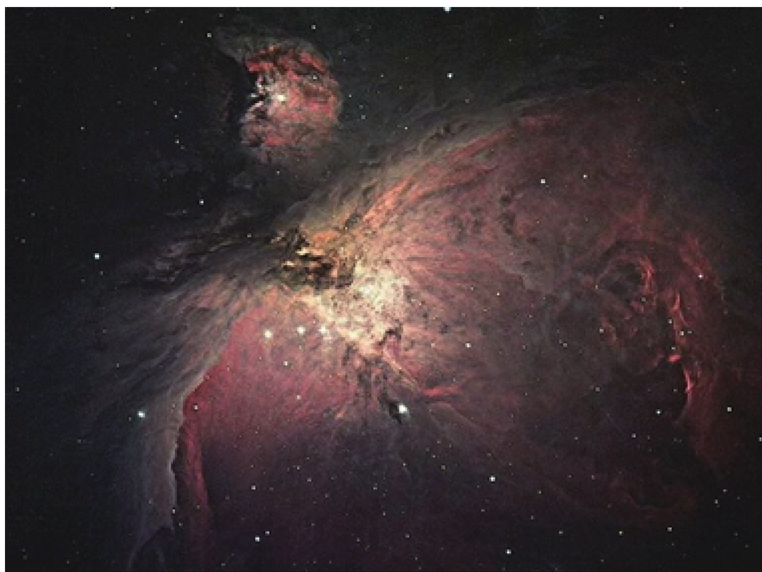


图9.12　蟹状星云（上）与猎户座大星云（下）。

1898年凯勒当上利克天文台的台长，开始用格罗斯利反射望远镜进行系统的星云照相观测。观测显示银河系中形状不规则的星云与那些结构更规则的星云之间的区别越来越明显。有一些星云尽管没有漩涡结构，但也有规则的形状，有圆形的或光滑的椭圆形外观，也像漩涡星云一样越向中心越明亮。大家普遍把这类有规则形状的星云叫做“漩涡星云”，尽管看不出它们有漩涡结构。凯勒估计格罗斯利望远镜能够看到大约120000个漩涡星云，也许其中的半数显示真实的漩涡结构。

分光术表明恒星的光可以分解成有吸收线的连续光谱，稀薄气体发出的光则可分解成明线光谱。1864年哈根斯用分光镜观测天龙座的一个行星状星云，发现它的光谱是明线光谱，这证明它不是一群星，而是一团气体。哈根斯进一步观测了他选定的其他星云，发现它们的光谱也是明线光谱，他说：“星云的谜被我窥破了。”



图9.13 昴星团反射星云

哈根斯时代的分光术还只能观测较亮的星云，而这些亮星云大多是银河系里的气体星云。真正的河外星云，在当时的分光镜中还很难看清它们的光谱。事实上哈根斯也确实观测过仙女座大星云，他也发现了它有像恒星一样的连续光谱，但由于光线被棱镜色散后变得非常微弱，很难看清连续光谱上有什么谱线。加上哈根斯存有“星云皆气体”这一先入为主的观念，所以对仙女座大星云的连续光谱只给出了一个牵强的解释，错失了得出“星云本质上分为两种”这一结论的机会。

正当哈根斯对星云进行分光研究时，照相术也被用到星云研究中。对星云的照相研究发现，有些人用目视观测报告的“可分解”星云，如蟹状星云、猎户大星云等，都是不可分解的。这一结论支持“星云皆气体”的观点。

随着照相术的发展，它还被用来与分光术结合拍摄星云的光谱。1899年德国天文学家沙伊纳经七个半小时曝光，拍得仙女座大星云的暗淡光谱，发现它确实和恒星光谱相似：在连续光谱背景上出现很多吸收线。于是沙伊纳报告说：仙女座大星云是遥远的恒星系。然而，斯里弗在1912年发现昴星团反射星云的光谱也是呈现恒星那样的带吸收线的连续光谱。昴星团属于银河系无疑，所以斯里弗认为仙女座大星云也是如此，并非河外星系。

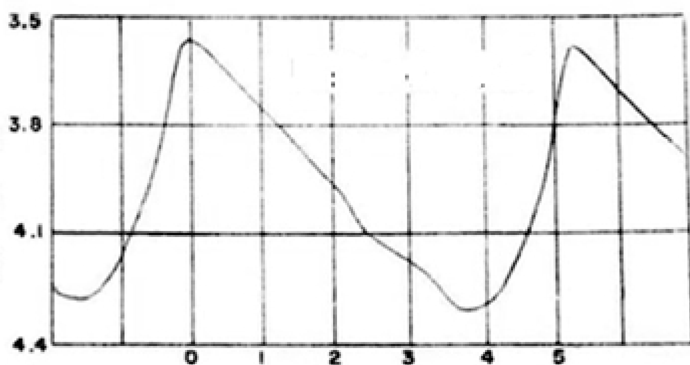


图9.14　造父一（仙王座δ）的光变曲线。

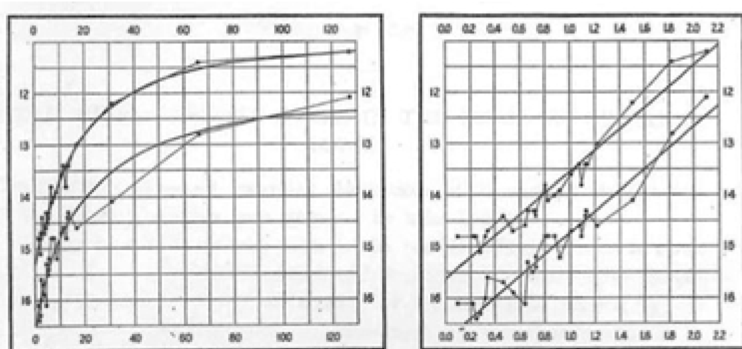


图9.15勒维特发表的周光关系，图中上下两条线表示造父变星的极大和极小亮度。上左：纵坐标为视星等，横坐标为天数；上右：纵坐标为视星等，横坐标为天数的对数。

因此，用望远镜分解云雾状天体不能决定是否存在河外星系。能够分解的往往是银河系内成员，而真正的河外星系当时还不能分解。用光谱分析方法也不能作为判断依据，因为星云发射何种光谱，情况往往比较复杂。

河外星系是否存在？这在19世纪末和20世纪初仍旧还是个难题。等到20世纪20年代天文学家有能力准确定出银河系的大小和一些旋涡星云的距离之后，问题才算真正解决。

3.勒维特的“周光关系”和沙普利的“量天尺”

为了确定银河系的结构，一些天文学家，如慕尼黑天文台台长西利格和荷兰哥龙尼根大学教授卡普坦等，认为逐个地对可见恒星进行全面的研究是可行的方法。但是关于这些恒星所需的数据—它们在天空中的位置、视星等和自行等—积累得太慢了。



图9.16勒维特也是皮克林招募的团队成员之一，曾与坎农、莫里等一起为哈佛大学天文台的恒星光谱分类工作做出贡献。



图9 .17 一出描绘勒维特天文工作生涯的戏剧中的一幕。

三角法测得的恒星距离是最可靠的，问题的关键是只有非常近的恒星，它们的距离才能用直接的三角测量法确定。恒星距离大于100秒差距时，视差为0.01角秒，这时测量误差与视差本身大小相仿。

在这一筹莫展之际，一种特殊的变星带来了一个契机。早在1782年古德里克发现造父一（仙王座δ）亮度以5.37天的周期发生变化，后来人们相继发现另一些恒星也以与造父一相似的方式（光变曲线相似）发生变化，有特别规则的光变曲线和固定的光变周期—一般在1～50天之间，这类变星后来被称为“造父变星”。

20世纪初在秘鲁阿雷基帕一座天文台工作的美国女天文学家勒维特在拍摄小麦哲伦云的照片时发现小麦哲伦云中有许多变星。她把周期长于1.2天的变星按照亮度排列起来，发现它们的周期也按照数值大小排列，周期越长的恒星越亮。

1912年她发表了小麦哲伦云内25个周期从2天到120天、视星等从12.5等到15.5等的变星资料，正式提出这些变星的视星等与光变周期之间存在某种确定的关系，即周光关系。



图9.18　沙普利

赫茨普隆看到勒维特的周光关系之后指出，小麦哲伦星云中的变星都是造父变星。这样，就只需要测出银河系内一颗造父变星的距离并测定它的视星等和光变周期，就能把勒维特发表的周光关系图中的纵坐标改为绝对星等。[1]这就是所谓的周光关系零点的测定。但是银河系内的造父变星也都相当遥远，无法用三角法测定距离。

1915年沙普利利用11个造父变星的自行和视向速度资料求出了它们的距离，并用统计方法定出了周光关系的零点，于是得到了造父变星的周期与绝对星等间的对应关系。这样，根据测得的造父变星周期，通过周光关系可读出绝对星等，然后利用绝对星等的定义可求出造父变星的距离，用这种方法定出的距离一般称为造父视差。

绝对星等是赫茨普隆此前已经提出的概念，定义天体在10秒差距远处的视星等为该天体的绝对星等。



图9.19　银河系新图景（其中的尺度数据为现代数据）。

沙普利假定单颗的造父变星与小麦哲伦星云中的以及球状星团中的造父变星在物理上是类似的。然后寻找球状星团中的造父变星。要证认一颗星是造父变星，并确定它从最亮到下一个最亮这个周期所经历的天数，需要有许多这样的照相底片。沙普利努力工作，最后确认了一打最近的球状星团中的造父变星的周期。



图9.20利克天文台的巴纳德用广角肖像摄影镜头拍摄银河系各区域，照片显示在一些区域很少有或几乎没有恒星。起先巴纳德相信这

是恒星的真实分布，但是当他继续工作下去时，他几乎是很不情愿地承认是暗的遮光物质。在1927年发表的他的两册照相星图中，他收录了一个表，列出了370个较显著的暗星云。图为巴纳德暗星云表中编号第72的蛇形暗星云。



图9.21已有的工作显示，在银河系中轴面上看来确实存在着一层遮光物质。1869年普罗克特通过艰苦的工作，把约翰·赫歇尔列出的4000个“不可分解”的星云绘制到天图上，结果表明这些星云很少出现在靠近银河的天区内。这些星云后来被证明大多是漩涡状的。

利克天文台的柯蒂斯在1920年跟沙普利的大辩论中争辩道，从侧面看到的漩涡星云至少有一条外围的暗物质带，如果我们星系有这样一条暗物质带就可以解释为什么漩涡星云看上去都远离银河。图为漩涡星系NGC4594中轴面上的暗物质带。

在更远的球状星团中，造父变星变得太微弱了而无法再看见。沙普利注意到，任何一个球状星团中最亮的恒星与另外的球状星团中最亮的恒星在亮度上是接近的。他把这个作为另一个同一性假设的基础，这个假设把他从他能看见造父变星和最亮恒星的球状星团带到他只能看见最亮恒星的球状星团。

最后，在甚至最亮的恒星再也无法分辨的距离处，沙普利又做出了另一个假设，认为球状星团本身也是相同的。因此，通过比较一个遥远球状星团的视直径与一个已知距离球状星团的视直径，可以得出前者的距离。

沙普利利用威尔逊山天文台1.5米反射望远镜研究当时已知的100个左右的球状星团。1917年沙普利得到最远的球状星团的距离大约为200000光年。这是公认的整个银河系直径的好几倍。





图9.22　哈勃和胡克望远镜。

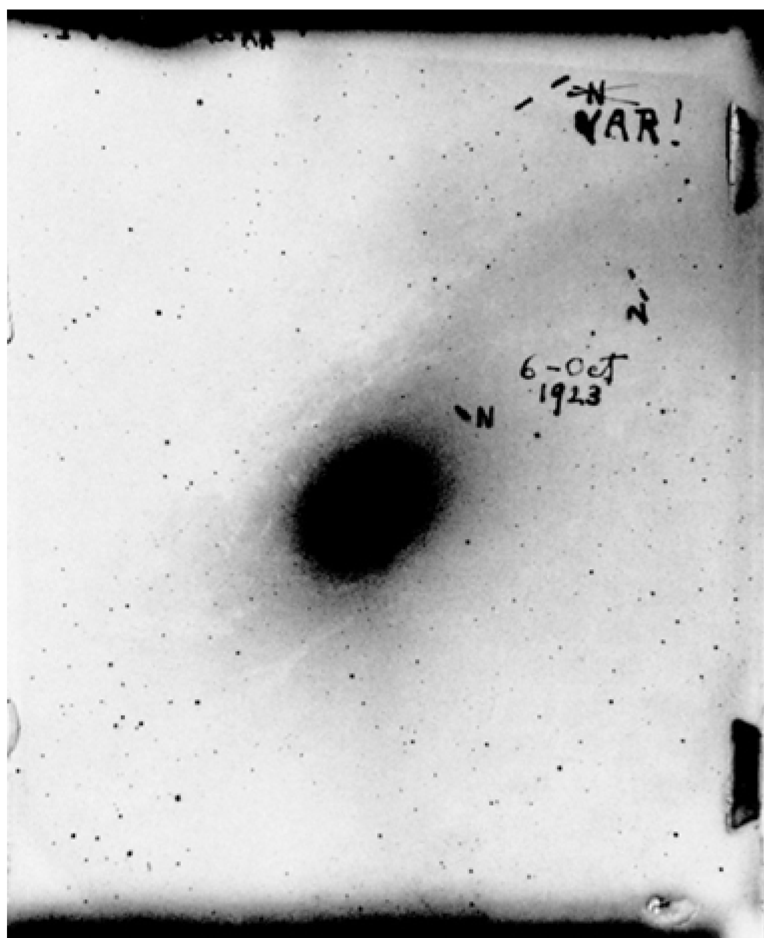


图9.23　哈勃拍摄的仙女座造父变星底片。

沙普利测得了这些球状星团的造父视差，并对它们的空间分布进行统计，发现其中有三分之一数目的球状星团位于占天空面积只有2%的人马座内；90%的球状星团位于以人马座为中心的半个天球上。沙普利猜测，球状星团在银河系内是均匀分布的，由于太阳不在银河系中心，造成了这种视觉上的不对称。沙普利从球状星团的距离统计估算银河系中心在人马座方向，太阳离它约5万光年，银河系直径为30万光年。

从威廉·赫歇尔以来人们一直认为太阳在银河系的中心，沙普利为建立正确的银河系图像跨出了重要的一步。但是由于沙普利在推算球状星团的造父视差时忽略了星际消光，所以他的银河系尺度偏大。

特伦普勒在1930年发表了他对星际削光的研究结果，得出银河系

各个方向上平均的普遍吸收量为每5000光年星等减弱1等，这个值比现在公认的值小一点点。物质向银盘集中的程度是非常厉害的，以致肉眼和望远镜都看不见约30000光年以外的银核，这解释了为什么人们不能看清楚银河系的漩涡结构。

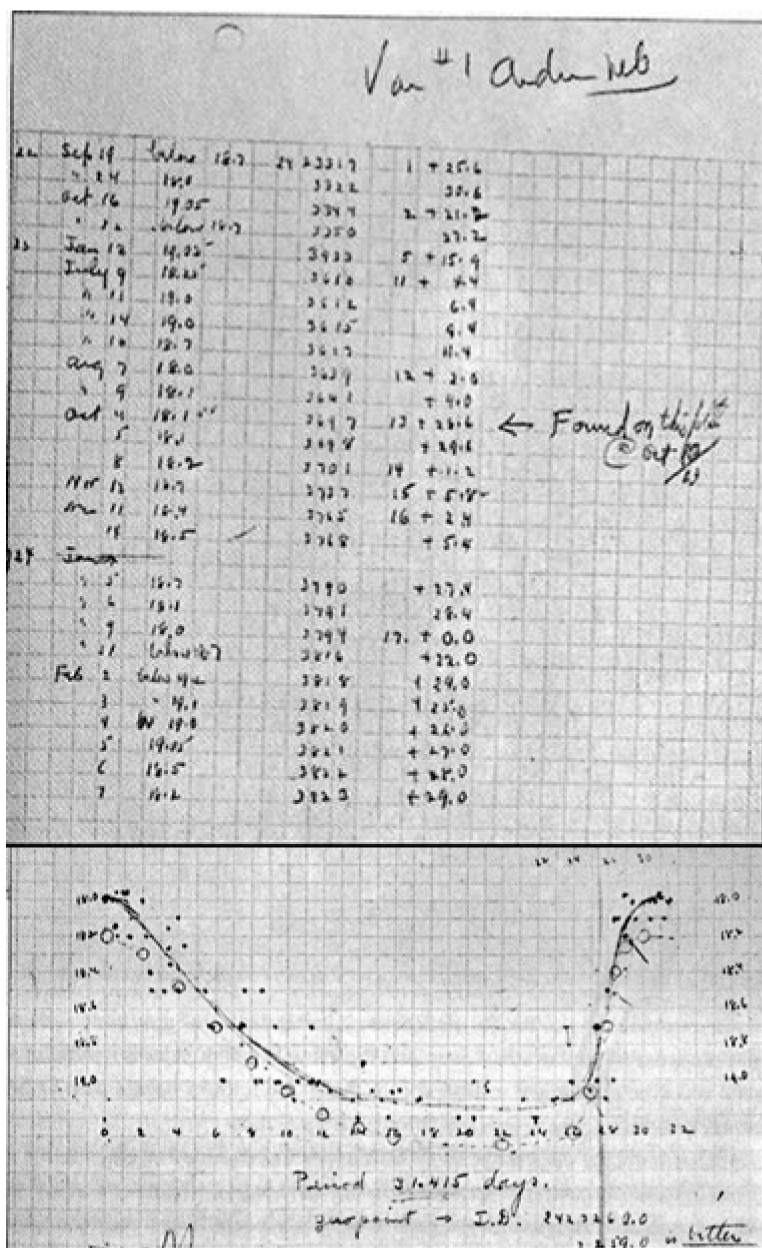


图9.24哈勃手绘的造父变星光变曲线。上左：哈勃翻找过的威尔逊山底片档案中的部分变星光度资料。上右：典型的造父变星光变曲线形状：快速升高，缓慢下降，周期是31.415天。

4.哈勃的探索

要解决河外星系是否存在的第二个关键问题，就是要测定那些星云的距离。

事情的转机又是落在造父变星身上。1923年哈勃在威尔逊天文台用当时最大的100英寸反射望远镜（胡克望远镜）通过照相观测将仙女座大星云的外围分解成单个恒星，从中搜索新星。他在第一张底片上就找到了一颗“新星”，然后他在威尔逊山天文台的照片档案中去搜索这颗“新星”，发现从1909年开始超过60张底片上都有这颗星，亮度有时暗于19等，有时亮到18等。显然这不是一颗新星，而是一颗变星。底片的数量足够让他绘制出这颗变星的光变模式。结果显示这很可能是一颗造父变星。

为了确认这一点，哈勃在1924年2月头一个星期里拍摄了一系列底片，证实了这颗变星的光度确实像所有的造父变星一样从最暗迅速变亮。最后哈勃确认了这颗造父变星光变曲线的特征形状和31天多的光变周期。造父变星的光变周期越长，它的光度就越大。而这颗星最亮时看起来只有18等。它是这样亮，而看起来又是这样暗，它的距离，也即星云的距离，足有一百万光年。即使按照沙普利对银河系大小的估计，这个星云也远远位于银河系之外。

哈勃又在仙女座大星云证认出更多的造父变星。还在三角座M33和人马座NGC6822中发现一些造父变星。他利用勒维特、沙普利等人所确定的周光关系，定出这三个星云的造父视差，证明它们远在银河系之外。

由于此前与哈勃同在威尔逊山天文台的范马宁通过比较前后的底片，宣称观测到了漩涡星云的自转。如果星云在短时间里有能觉察到的自转，那么必定是小而且近。如果它们距离遥远，有巨大的直径，那么星云的外围部分将以难以置信的高速度旋转。



图9.25　仙女座大星系（M31），拍摄者：Adam Evans。

哈勃困扰于自己的结果与范马宁的不相容，对于是否公开发表他的结果犹豫不决。最后，在沙普利等人的坚持下，哈勃答应在他缺席的情况下，在1925年元旦美国天文学会的会议上宣读一篇概述他的重要发现的文章。

5.太大的银河系

存在河外星系这一点大多数人已无异议。但是沙普利确定的银河系直径大约有300000光年，根据哈勃的仙女星系距离推出它的直径只有银河系直径的十分之一，而体积仅有其千分之一。我们的银河系在宇宙中显得非常特殊。这个异常由于1930年特伦普勒关于星际消光的文章的发表而得到部分消解。由于遮光物质消弱了远处银道面上天体的光线，让沙普利认为银河系造父变星比它们的真实距离更远。因此银河系的直径减小到了100000光年。同时，增加了敏感度的照相底片显示仙女星系的直径比以前认为的伸展得更远。即使这样，银河系仍旧是一个超级系统，而相比之下仙女星系很小。

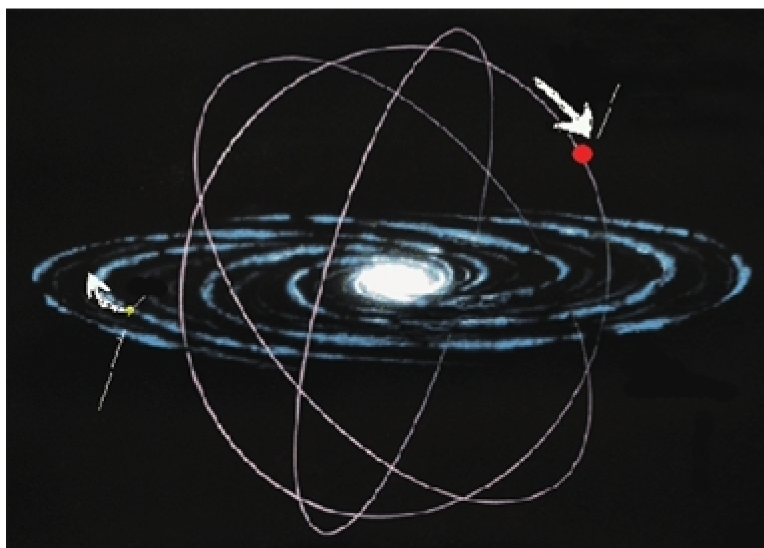


图9.26　银河系中星族I恒星和星族II恒星的分布。

天文学发展到20世纪，让许多天文学家养成了这样的本能：任何使我们在宇宙中处于优势地位的理论都会使他们感到不舒服。仙女星系在许多方面都类似于银河系，它们都包含数量众多的亮造父变星、球状星团系统和由一层尘埃和高亮度蓝星勾划出的旋臂。这都使得两者的大小差异更加令人迷惑。而仙女星系中的新星却被认为是暗于银河系中的同类，最亮的恒星和最亮的球状星团也是如此。

解决问题的途径看来在于对仙女座大星云进行更细致的观测。现在它的外围已经在照相底片上被分解成单个恒星，但中央核球部分还

没有。当时最大的仪器是威尔逊山的100英寸望远镜，分解中央核球部分已经超出了它的能力极限，尤其是附近洛杉矶的城市灯光使得这个愿望成为泡影。但是巧合的是，当美国加入“二战”之后，实行了灯火管制。大部分天文学家又都去服役了，留下的是一位德国人巴德，他因为有残疾，又漏掉了加入美国籍的仪式，所以只能留在天文台。



图9.27　帕洛玛山天文台200英寸反射望远镜。

巴德在用100英寸望远镜进行长时间曝光方面技术非常娴熟。1943秋天，他拍摄了仙女星系的中央核球部分，每张底片曝光约4个小时，照片上显现出成千上万颗恒星，进一步证实了漩涡星云确实是与银河系一样的恒星系统。巴德又进一步拍摄了M32、NGC205的照片，然后绘制了包括仙女星系在内的三个星系的赫罗图。他发现这三个星系的中央核球部分亮星的赫罗图和外围部分亮星的赫罗图不一样。

前者和银河系内球状星团的赫罗图相似，后者则和银河系疏散星团的赫罗图比较接近。于是巴德提出，银河系和其他漩涡星系的恒星可以分成两个星族。

1944年巴德发表了他关于恒星分属于两个星族的结论。星族I恒星富集于银道面。它们包括像太阳以及他的邻近恒星，毕星团、昴星团等疏散星团中的恒星。它们由银道面的星际物质、气体、尘埃形成，它们的平均化学组成与太阳的相似。所有的星族I恒星、气体和尘埃都沿着近圆轨道绕银河系中心旋转。

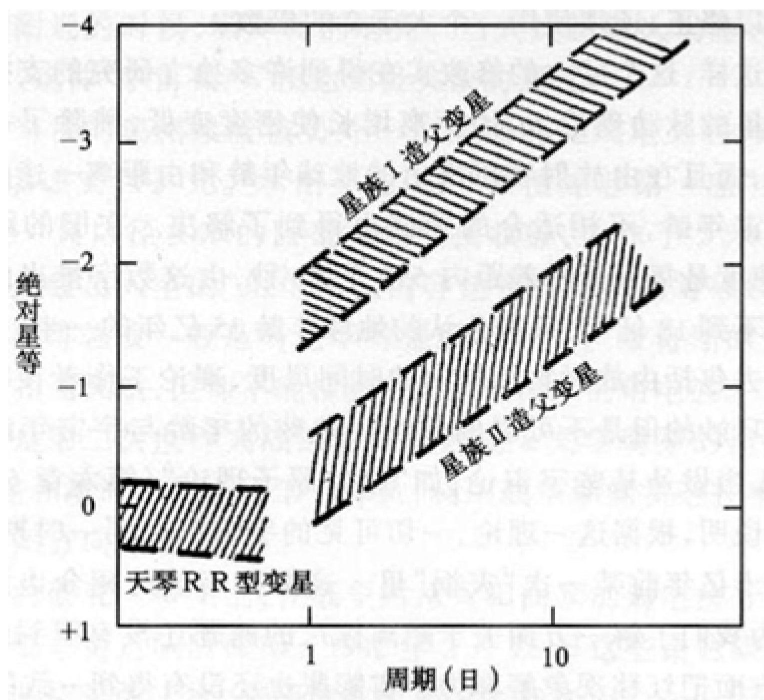
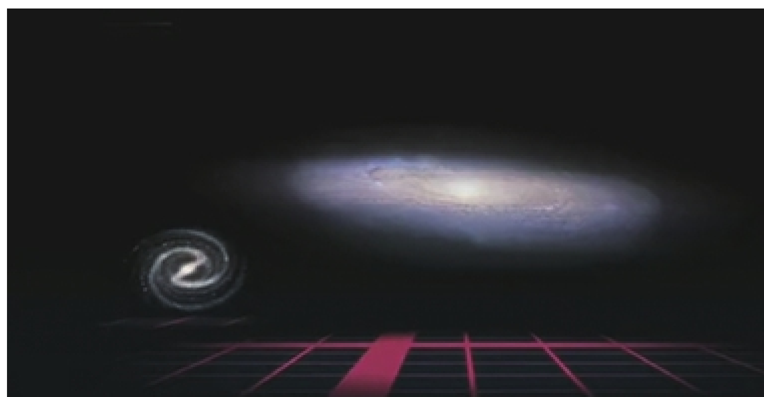


图9.28　星族I和星族II造父变星的不同周光关系。

星族II恒星则是老年恒星，存在于没有气体和尘埃的椭圆星系，也存在于漩涡星系中同样不含尘埃的球状星团中，还有漩涡星系的中央核球部分。在银河系中，球状星团和孤立的星族II恒星沿着椭圆轨道绕银心运动，这些轨道向银道面倾斜的角度各不相同。星族II恒星不参与太阳和星族I恒星在银道面上的快速圆周运动。当星族II恒星运动到太阳邻近区域时，它们被测得的速度因而会变大。



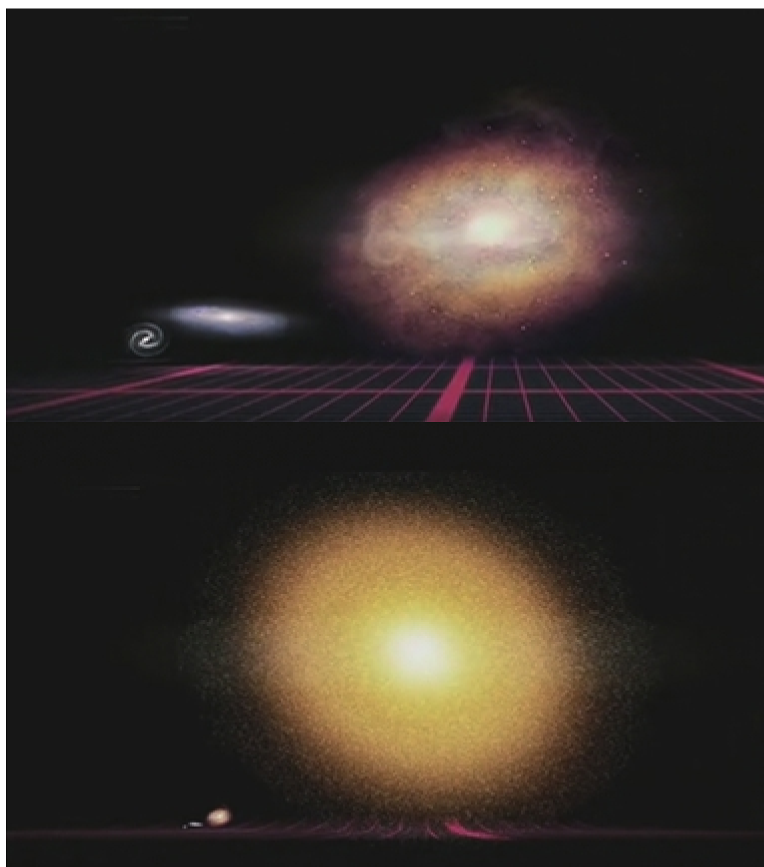


图9.29星系尺度对比图。上：银河系（左）和仙女座大星系（右）；中：从左到右，银河系、仙女座大星系和M87；下：从左到右，银河系、仙女座大星系、M87和IC-1011。

有一类变星叫天琴RR型变星，这类变星在球状星团中尤其多，所以常被叫做“星团变星”。周期为半天的天琴RR变星比周期为10天的造父变星暗大概两个星等。在用100英寸反射镜拍摄的仙女星系照片中，10天周期的造父变星视星等大约在20等，那个距离上天琴RR型变星亮度为22等左右—这超出了100英寸反射镜的分辨率，但在正建造于帕洛玛山的200英寸反射镜能力所及之内。

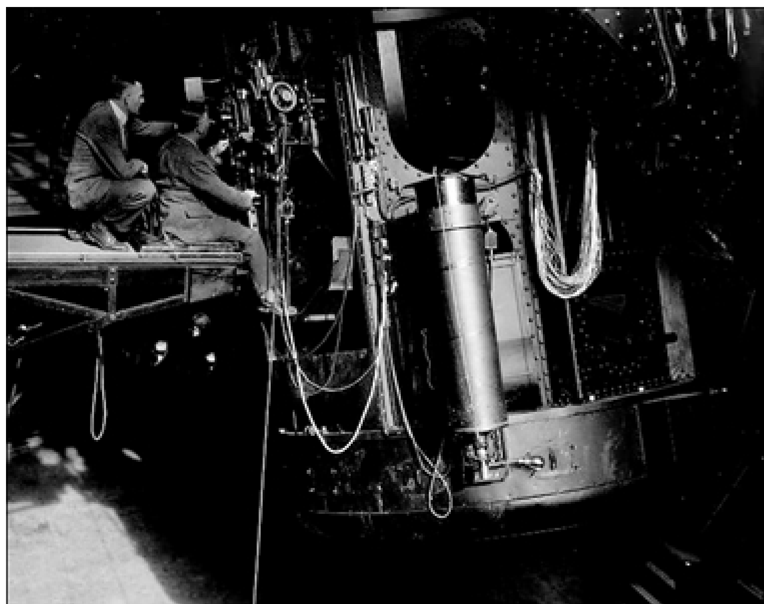


图9.30　哈勃和休马森在威尔逊山天文台。

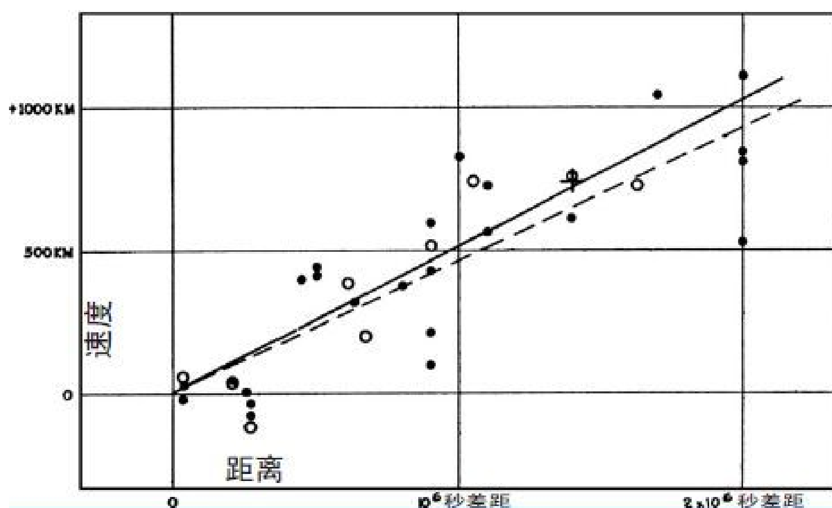


图9.31　哈勃定律。

1948年帕洛玛山的200英寸反射镜一投入使用，巴德就开始用它拍摄仙女大星系。但是原本应该出现在底片上的“星团变星”却怎么也找不见。由此可以推断，跟据造父变星求得的仙女星系距离是偏小的。巴德还在仙女星系中观测到300多颗造父变星，他发现这些造父变星既有属于星族I的，也有属于星族II的，二者遵从不同的周光关

系。

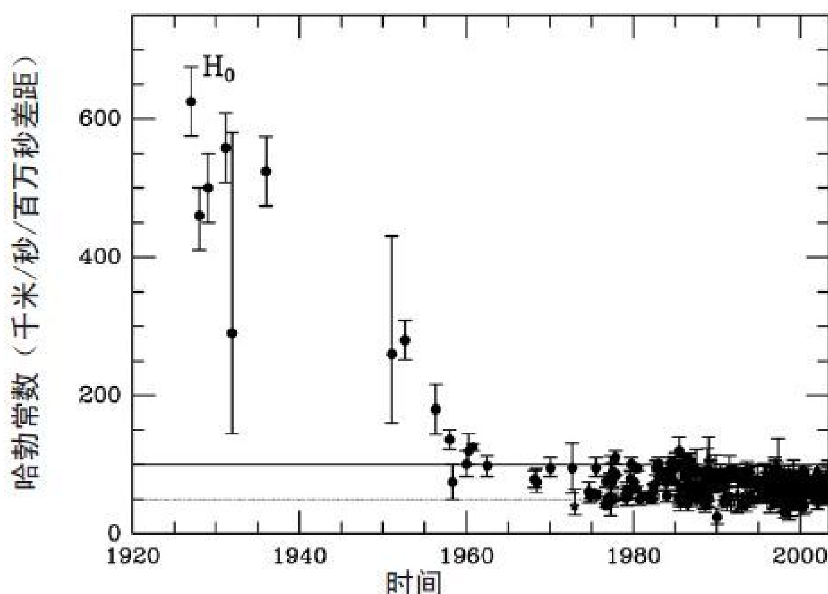


图9.32　历年来发表的哈勃常数值变化趋势。

1952年巴德给出了新的周光关系。分属两个星族的造父变星的周光关系基本平行，但绝对星等差1.5等左右。沙普利用来校正周光关系零点的近距离造父变星位于银河系的旋臂中，也即属于星族I，这些恒星现在被证明是比以前认为的要更亮—所以也更远。哈勃在仙女星系旋臂中搜寻到的造父变星也属于星族I，它们同样要被移到更远的位置上。哈勃原来定出仙女星系的距离在90万光年左右，巴德校正后的距离为230万光年。但是沙普利用来确定球状星团距离也即银河系直径的造父变星属于星族II，它们的亮度被准确估测了。结果就是银河系的直径维持原状，而仙女星系的距离要加倍，所以它的直径也要加倍。这样我们的银河系失去了沙普利曾经赋予她的优势，而被给予了如今这样一个平凡的地位，某种程度上她是仙女星系的一个小妹妹。



图9.33　爱因斯坦讲解他的场方程。

6.星系红移和现代宇宙学

1912年以来斯立弗发现漩涡星云有巨大的视向速度。到1925年，已经得到总共45个星云的视向速度，它们中的大部分由斯立弗测定。最大的视向速度超过了每秒1000公里，意味着这些星系是银河系引力控制之外的独立物体。

从1925年起，哈勃在100英寸反射镜上为“漩涡星云的退行速度和它们的距离的关系”问题投入了大量的观测时间，在他生命最后数年又用200英寸反射镜观测。在那些年里，对这些天体的看法的改变反映在对它们的叫法上：“漩涡星云”变成了“河外星云”，最后是现代叫法“河外星系”。

哈勃跟他的同事休马森一起工作。休马森将他的观测技巧集中在更远（和更暗）星系视向速度的测定上，哈勃设计出根据照相底片上像的亮度来确定真实距离的方法。

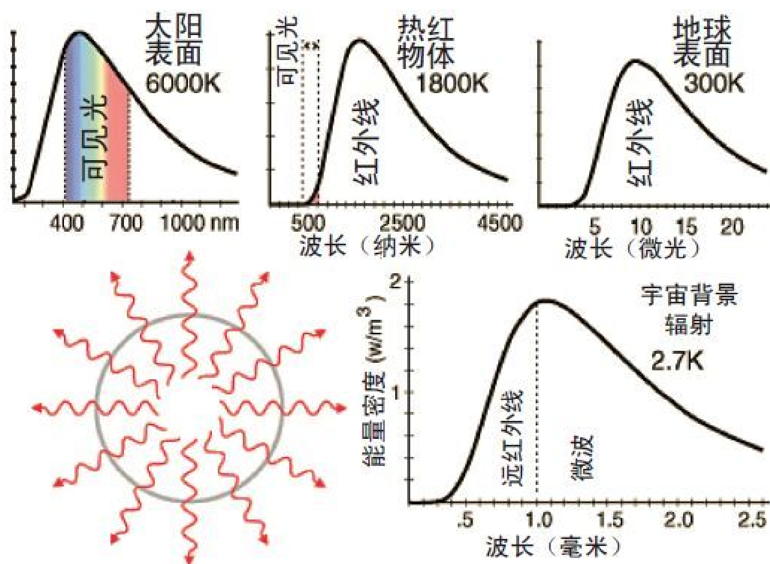


图9.34各种温度辐射体的辐射谱比较。依次为太阳表面、高温物体、地球表面和宇宙微波背景辐射。

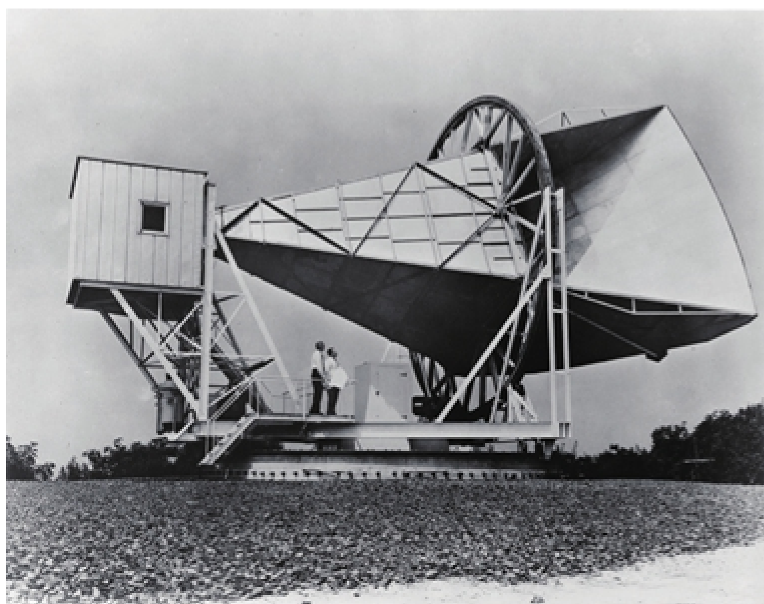


图9.35　彭齐亚斯和威尔逊用来发现宇宙微博背景辐射的号角式反射天线。





图9.36　彭齐亚斯（上）和威尔逊（下）。

到1929年，哈勃已获得24个星系的视向速度和独立的距离测定，他发表了一幅速度作为距离函数的图，显示每一百万秒差距（即1Mpc）退行速度增加500公里/秒。

哈勃首次给出的这个量后来叫做哈勃常数，这是宇宙学基本常数之一。而“星系退行速度正比于它的距离”被叫做哈勃定律，或红移定律。

顺着宇宙膨胀的思路，当时间倒退，星系就相互靠近，在早先某个时候宇宙必定曾经极度稠密。从那时到现在这段时间可以叫做“宇宙的年龄”，宇宙年龄就是哈勃常数的倒数—哈勃常数越大，宇宙越年轻。

这在20世纪40年代产生了一些问题：从哈勃常数算出的宇宙年龄为18亿年，小于公认的地质学家所要求的地球年龄。巴德对造父变星定标的修正把哈勃常数缩小了约一半，变为260km/s/Mpc。1958年当哈勃的学生桑德奇表明哈勃原来以为的星系中最亮的单星事实上是一些嵌入气态星云的高光度星集，哈勃常数进一步向下修订到约为75km/s/Mpc。这两次哈勃常数的修正都减轻了宇宙年龄与地质年代尺度的冲突。NASA综合了最新的几种观测数据，给出哈勃常数推荐值为70.8±1.6km/s/Mpc，对应的宇宙年龄约为138亿年。

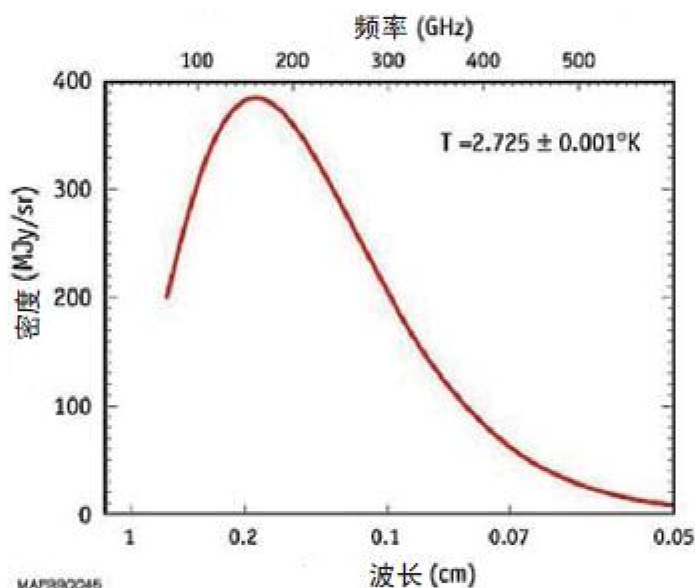


图9.37　COBE的宇宙微波背景辐射精确辐射谱。

爱因斯坦利用广义相对论引力场方程进行了宇宙学研究。到1917年，爱因斯坦试图把广义相对论方程应用到整个宇宙上去，来建立一个数理的宇宙模型。但他发现，在只有引力作用的模型中，宇宙不是膨胀就是收缩。为了使这个宇宙模型保持静止—正如我们的经验所感觉到的那样，爱因斯坦在他的方程里增加了一项，他称之为宇宙项，它表示是一种斥力，随着天体之间距离的增大而增强，用来抵消引力的作用，以保持一个静态的宇宙。

这样，爱因斯坦解算出了一个有限无界、没有中心的静态宇宙：宇宙空间是封闭的，但又是无边的、无止境的。爱因斯坦的宇宙半径大约35亿光年。





图9.38约翰·马瑟和乔治·斯穆特因领导了COBE探测计划而获得2006年度诺贝尔物理学奖。

在爱因斯坦提出他的引力场方程不久，先有荷兰物理学家德西特于1917年解算出爱因斯坦的方程不只有静态解，后有苏联数学家弗里德曼于1922年指出爱因斯坦的静态解是不稳定的。弗里德曼进一步主张应该丢弃宇宙项，宇宙就应该是膨胀的。这些结果起先没能说服爱因斯坦。

但当爱因斯坦了解到哈勃的工作并于1931年在加州看到了天文学家们的计算之后，他正式宣布放弃那个宇宙项，并把引入宇宙项到那个方程中称作是他一生中犯的最大错误。

哈勃的“红移定律”预示着宇宙在膨胀，此后纷纷出笼的宇宙模型都把哈勃红移考虑在内。到20世纪的40年代，美籍俄裔物理学家伽莫夫和他的博士生阿尔法为了解释宇宙中元素的形成，提出在宇宙膨胀初期存在过一个高温高密的“原始火球”。在这样一个特殊状态中，同时存在着质子、中子、正负电子和中微子，并处于一种平衡状态。随着宇宙膨胀，温度降低，平衡过程被破坏，一部分中子因β衰变成为质子和电子，质子由于俘获中子成为重质子。这样，由于反复发生中子俘获或质子俘获和β衰变，形成了更重的元素。

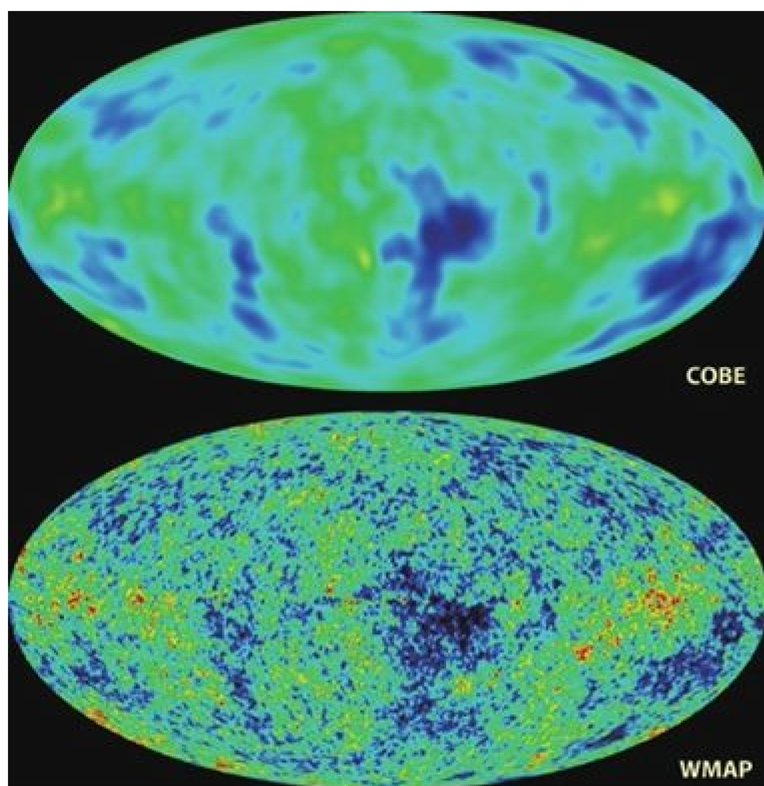


图9.39宇宙微波背景辐射的各向异性起伏：威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）以更高的精度验证了COBE的观测结果。

为了让他的理论叫起来响亮一点，伽莫夫拉了著名核物理学家贝蒂一起署名，于是这一理论被称作αβγ（Alpher, Bethe Gamow）理论。作为该理论的一种竞争理论的提出者，剑桥大学天文学家霍伊尔在1949年的一次BBC广播节目中把它戏称为“大爆炸”（theBigBang）理论，霍伊尔就这样成了这个现在几乎已经家喻户晓的流行宇宙理论的命名者。

大爆炸理论提出了几项可用观测验证的预言，其中最早也最直接的观测证据包括从星系红移观测到的宇宙膨胀、宇宙间轻元素的丰度、对宇宙微波背景辐射的精细测量等。



图9.41　霍伊尔。

在大爆炸理论提出之后，普林斯顿大学的迪克根据伽莫夫的理论也在进行宇宙学研究，在1964年他也预言了高于绝对零度以上几度的背景辐射。迪克的小组还开始建造一台仪器来探测这种辐射以检验这一理论。与此同时，贝尔电话实验室的两位工程师彭齐亚斯和威尔逊正在校正为测试卫星通讯而设计的号角式反射天线。他们以极大的耐心追踪和消去各种干扰源。但是他们发现，有一种无法解释的背景噪声来自天空的各个方向，对应的温度大约是3.5K。他们向迪克咨询引起这种噪声辐射的可能原因，不料获悉他正在积极寻找他们已经找到的东西—大爆炸宇宙理论预言的微波背景辐射。1978年彭齐亚斯和威尔逊因他们的意外发现与苏联低温物理学家卡皮查分享了该年度的诺贝尔物理学奖。

对于宇宙微波背景辐射还有一个需要深入研究的特征就是它的各向同性。如果宇宙微波背景辐射是绝对地各向同性的话，宇宙就应该是绝对平坦的，那么就难以解释我们观测到的宇宙中恒星的成团倾向，也就是在星系、星系团和超星系团这样的大尺度上物质密度的不均匀性。因此一些科学家推断，宇宙在其大爆炸之初必定有一种微小的起伏，就像平静湖面上的微小涟漪。宇宙的这种微小“涟漪”，反映了宇宙大爆炸之初的微小不规则。正是因为有了这种不规则，宇宙才能演化成为现在这样的丰富结构。

1989年，美国NASA发射了宇宙背景探测者卫星（COBE），

1990年COBE的“远红外绝对分光光度计”小组宣布，宇宙微波背景辐射非常精确地等同于绝对温度为2.725±0.002K的黑体辐射。1992年，由乔治·斯穆特领导的小组发文宣布，宇宙微波背景辐射有十万分之一的各向异性起伏。这个起伏量恰好是大爆炸理论解释我们观测到的这个宇宙之所以能够形成所需要的。COBE除了证实宇宙微波背景辐射为黑体辐射和它的各向异性之外，还在早期星系、星际尘埃、宇宙暗物质、暗能量等多个宇宙学领域取得了重要成果，大大地推动了宇宙学研究的进程。

对于伽莫夫等人提出的大爆炸理论，三位剑桥天文学家霍伊尔、邦迪和戈尔德不以为然，他们反驳说，既然宇宙各项同性、处处均匀，宇宙中所有的空间位置都是等价的，那么根据相对论的时空统一性，所有的时刻也应该是等价的。也就是说，宇宙间物质的大尺度分布，不仅在空间上是均匀且各项同性的，在时间上也应该是保持不变的。在任何时代、任何位置上观测者观测到的宇宙图景在大尺度上都应该是一样的。他们将这个原理称为“完美宇宙学原理”。根据这一原理，他们在1948年提出了一个稳恒态宇宙模型。

根据稳恒态理论，宇宙从未有过开始，也没有结束，无所谓过去，也无所谓将来。宇宙处于连续的创造过程之中，并且在大尺度上，包括任何时候和任何地方，都是一样的。稳恒态理论考虑了哈勃的星系退行，认为宇宙在膨胀时，星系在各个方向上简单地飞离，就像烤蛋糕时蛋糕上的葡萄干随着蛋糕膨胀而相互远离。

这时物质的总体密度减少，但不会低于一个临界密度，当物质密度接近于这个临界密度时，为了填补星系退行后留下的虚空并保持宇宙总的外观，物质就会在星系际空间创生。物质的创生率为1太阳质量/百万立方秒差距/年，或者1氢原子/立方米/10亿年，以这个速度创生出来的氢恰好用来形成新的星系团。

每个新的星系团随着宇宙的膨胀而逐渐衰老，以至于死亡，而后又有新的星系团形成。新星系形成，老星系死亡，但宇宙的总密度始终保持不变，并且在某一瞬间总是存在着各种不同年龄的星系。因此，不论任何时候观测到的宇宙都是一样的。

稳恒态学说虽然也能解释不少宇宙学效应，譬如由于承认宇宙膨胀，可以解释哈勃效应，但该理论本身还存在着一些严重缺陷。首先，由于稳恒态理论宣称物质可以无中生有地被创造出来，否定了物质和能量守恒定律，因此很难被大多数学者接受。其次，稳恒态模型自身也存在着一定的不确定性。宇宙到底在什么尺度上表现为稳恒态呢？显然不是太阳系的尺度，也不是银河系尺度，甚至不是星系团的尺度。提出稳恒态模型的主要人物从来没有就此问题做出过明确的说明。最后最关键的一点是，稳恒态模型无法解释1965年被证实的宇宙

微波背景辐射。宇宙微波背景辐射是大爆炸宇宙学说的预言结果，因此成了大爆炸学说战胜稳恒态学说的关键证据。此后对极大多数人来说，稳恒态宇宙学说成为了一种历史。

稳恒态宇宙学说作为一种可被高度证伪的理论，应该说已经实现了他的历史价值。但正常的学术生态是，理论持有者永远不要轻易放弃自己的理论。霍伊尔和他的学生纳里卡在1980年完成的《物理天文学前沿》一书中用一个附录介绍了稳恒态宇宙模型，其中对在稳恒态模型中如何解释宇宙微波背景辐射提出了一种可能的机制。他们认为“从严密的数学解算结果的意义上来检验的话，稳恒态模型至今还没有完全被推翻”。

或许，正如《物理天文学前沿》一书中所写的：“宇宙学家的处境可以比作是晚间有一个人在灯光暗淡的街上寻找一枚丢失了的硬币，他唯一可以很好搜索的场所就是少数几盏路灯下面的地方。”面对宇宙，我们确实只能从我们已经掌握的规律出发去理解它。其实更重要的不是理解到了什么程度，而是这个不断进步的理解过程。稳恒态理论也好，大爆炸理论也好，最后都会消失在这个过程中，并成为前进道路上的一块块基石。

第十章 尾声：人类的宇宙生存

天文学的进步让人类明白了自己在宇宙中的位置：人类寄生的地球是一颗小小的行星，它的质量在太阳系中几乎可以忽略不计。地球所环绕的太阳也只是一颗普普通通的恒星，恒星在银河系超过1000亿。银河系在宇宙中也毫无特殊之处，宇宙中像银河系这样的星系超过2000亿。

地球不再是宇宙的中心，人类也不再是上帝的特别创造和唯一救赎的对象。那么人类在宇宙中该如何自处呢？诚然，与巨大的宇宙相比，人类只是一颗宇宙尘埃上不起眼的寄生物，他们的空间探索范围与浩渺的宇宙相比可以忽略不计。但只经过短短的几千年、宇宙的一瞬间，在智力上人类就进化到能够在宇宙尺度上理解宇宙。同时，人类也需要开始严肃地思考自身的宇宙命运了。



图10.1 “我们为什么存在……”

首先要思考的是人类在宇宙的出现。

“我们为什么存在？”“生命的本质是什么？”这些个原本由诗人、哲学家们和神学家来回答的问题慢慢地也变成了一个个科学问题。天文学家从“大爆炸”以来的宇宙历史中去寻找问题的答案，结果发现我们人类这样的智慧物种在宇宙中的存在纯属侥幸。他们发现宇宙中隐藏着一些常数，这些常数的数值需要如此精确，如果其中一个稍稍发生变化，那么就没有我们来问我们为什么存在了。



图10.2　美国影视制作人Roger Nygard导演的影片《存在的本质》。

这些常数中的第一个数是大数N（1036），它是把原子结合在一起的静电力和原子之间的万有引力之比，这个巨大的数字意味着在原子尺度上引力比静电力弱得太多了。但是引力就得这样弱，不然，如果N的后面少几个零，那么就只会出现一个昙花一现的小宇宙，没有一个生物会比昆虫大，也没有足够的时间让生物进化，因此宇宙中就不可能产生像人类这样的复杂生物。

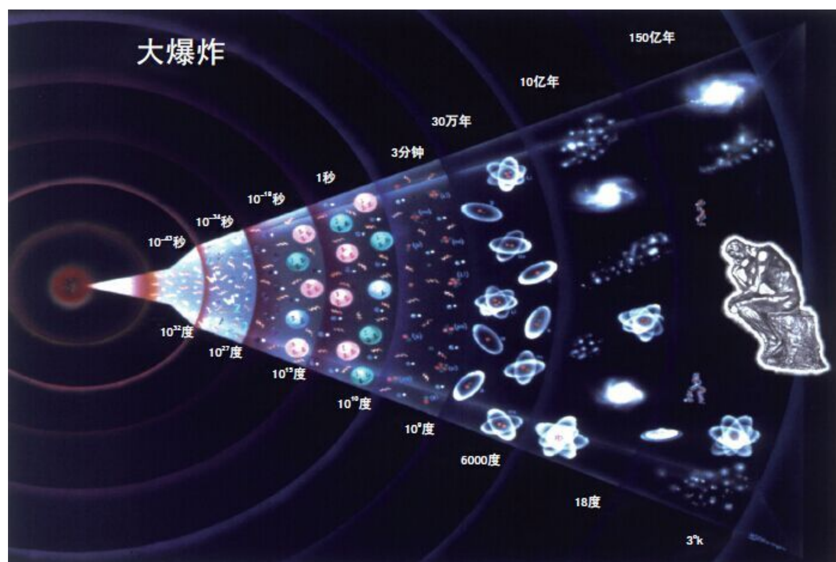


图10.3 “大爆炸以来的宇宙历史”，图片出处：grandunificationtheory.com。

第二个数是ε（0.007），它表明在恒星内部发生的核聚变过程中转化成能量的的质量比例，即只有0.7%的参与核聚变反应的质量转化成了能量。ε的大小决定了原子核内聚的坚固程度和所有原子的生成。如果ε是0.006，氢原子核的粘合力就很小，就无法形成稳定的氦核，这样的宇宙中氢元素一统天下，无法形成足够含量的碳和氧，其他重元素则更罕见；如果ε是0.008，质子之间的粘合力太强，无法存在氢元素，没有氢，水也就不存在了。因此，无论ε偏大或偏小，这样的宇宙中都不会有我们人类。

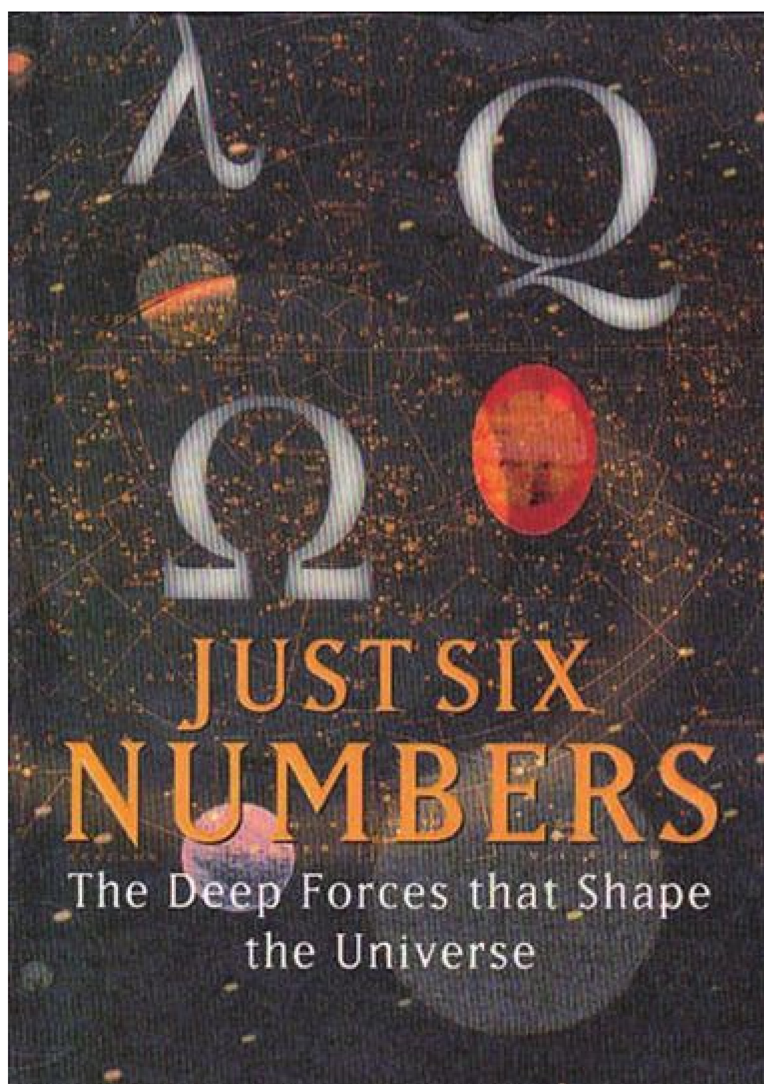


图10.4　英国皇家天文学家马丁·瑞斯的科普名著《六个数：塑造宇宙的深层力》。

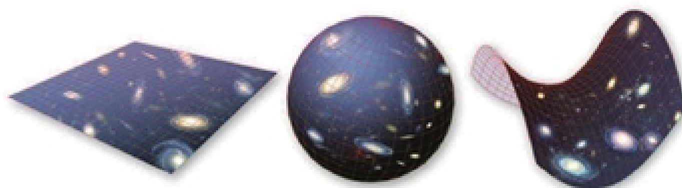


图10.5　宇宙是平坦的（Ω＝1）、封闭的（Ω＞1）还是开放的（Ω＜1）？

第三个数是宇宙常数Ω。观测证实现在的宇宙在膨胀，但这种膨胀会一直进行下去吗？还是膨胀到一定程度会发生收缩？这取决于宇宙的物质密度。天文学家算出了一个临界密度，Ω就是宇宙的实测密度与临界密度之比。如果Ω小于1，宇宙将一直膨胀下去，即是开放的；如果Ω大于1，宇宙最后将收缩，即是闭合的。按照目前的实测结果，Ω只有0.04，但天文学家推测宇宙中还有很多暗物质没有被测量到。Ω的大小还反映了引力与宇宙膨胀能量之间的关系。如果Ω太大，宇宙在开始演化之前就坍缩了；如果Ω太小，宇宙就会膨胀得太快，星系和恒星就无法形成。因此，Ω的大小似乎是被精心挑选好的，以便形成现在这样的宇宙。

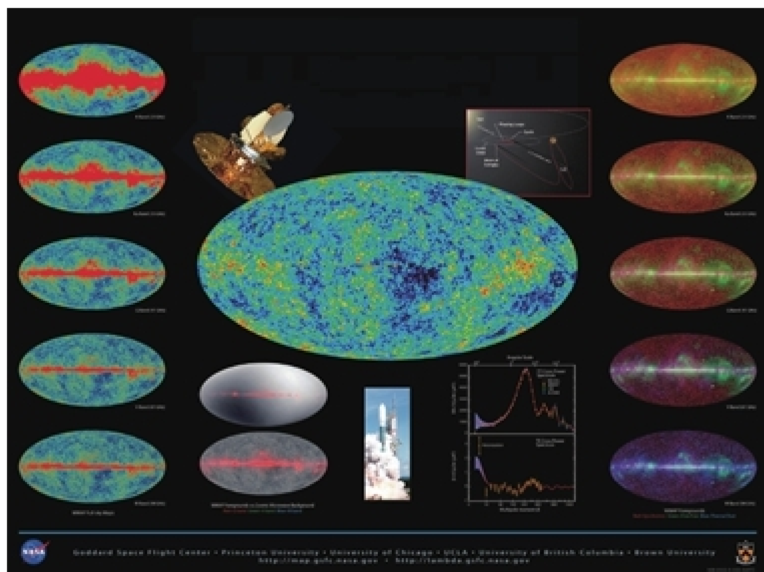


图10.6威尔金森各向异性探测器在多个波段上验证了宇宙尺度上的微小起伏。出处：NASA/WMAPScienceTeam。

第四个数λ曾经出现在爱因斯坦的静态宇宙模型中。爱因斯坦为了抵消宇宙中物质间的万有引力而引入的一个“宇宙项”，代表“宇宙斥力”。后来观测证明宇宙是在膨胀，爱因斯坦的“宇宙项”被抛弃。但是最新的观测表明，似乎存在一种宇宙“反引力”控制着宇宙的膨胀，即λ的值很可能并不等于零，爱因斯坦也许过早地承认了错误。尽管λ极其微弱，但它很可能控制着宇宙的膨胀和宇宙的最终命运。然而λ也只能极其微弱，不然它提供的斥力将使星系瓦解。

第五个数是Q，它的大小是10－5，即只有十万分之一。宇宙中

的主要结构，如恒星、星系、星系团等，都是由引力束缚在一起的。Q描述了这些结构的结实程度。

对宇宙中最大的结构星系团或超星系团来说，打破某星系团所需要的能量与该星系团的总“静止质能”（mc2）之比等于Q。Q值如此之小，还说明我们的宇宙大致上是各项同性的。Q值可以看做是宇宙的微小“涟漪”，反映了宇宙大爆炸之初的微小不规则。这种不规则对于今天的宇宙结构来说具有决定性的意义。1992年，宇宙微波背景探测器卫星（COBE）精确地描绘出了宇宙微波背景的黑体辐射谱，其涨落值就是这个Q。而正是因为有这些涟漪，宇宙才能演化成为现在这样的丰富结构。

第六个数是我们生活在其中的这个世界的空间维数D（3）。从古希腊开始，三维空间的几何性质已经被研究得很透彻了，但这个古老的空间维数现在被注入了新的内涵。天文学家认识到引力和静电力的平方反比关系是三维空间所固有的；靠万有引力束缚在一起的天体系统，譬如我们的太阳系，只有在三维空间中才是稳定的；我们生活在并且只能生活在一个三维世界中，如果D是2或4，生命将不复存在。

时间往往被称作第四维，但它与空间的维数不同，时间之维是不可逆转的，只能向一个方向前进，即只能迈向未来。

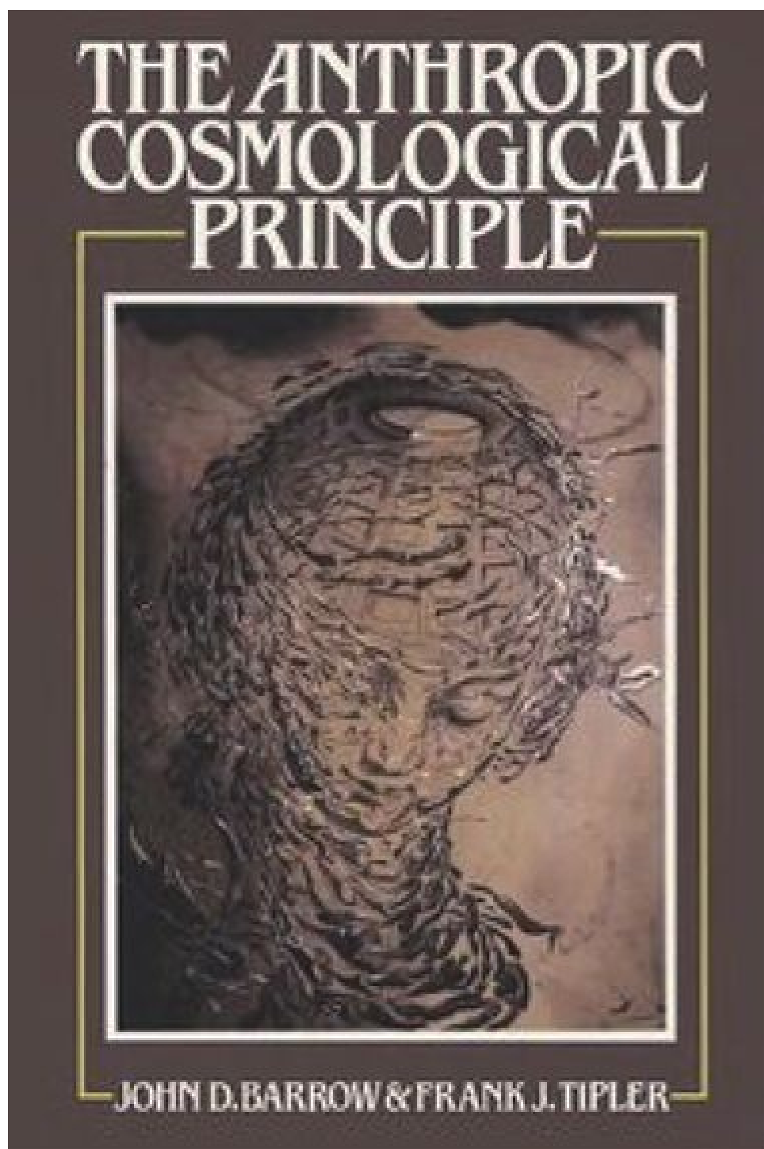


图10.7由约翰·巴罗和弗兰克·提普勒合著、牛津大学出版社于1986年出版的《人的宇宙学原理》一书对“人择原理”做了较早、较系统的阐释。

这6个数仿佛配成了一个制造宇宙的“秘方”，这些数字的大小十分敏感地影响着制造出来的宇宙。如果其中任何一个出现失调，那就不会产生恒星和生命。

有个比喻说，一个面对行刑队的犯人，有50个训练有素的枪手举枪向他瞄准。一排枪声过后，他发现自己竟然还毫发无伤地活着。现在我们人类在宇宙中的存在就有点类似上面那个侥幸活下来的犯人。我们其中的少部分人，已经在开始思考我们为什么存在的问题了。答案之一就是，我们生存于其中的宇宙，是经过对6个数的精细调谐才得以形成。正因为有这样的精细调谐，才有我们人类，才有我们在这里讨论这个问题。

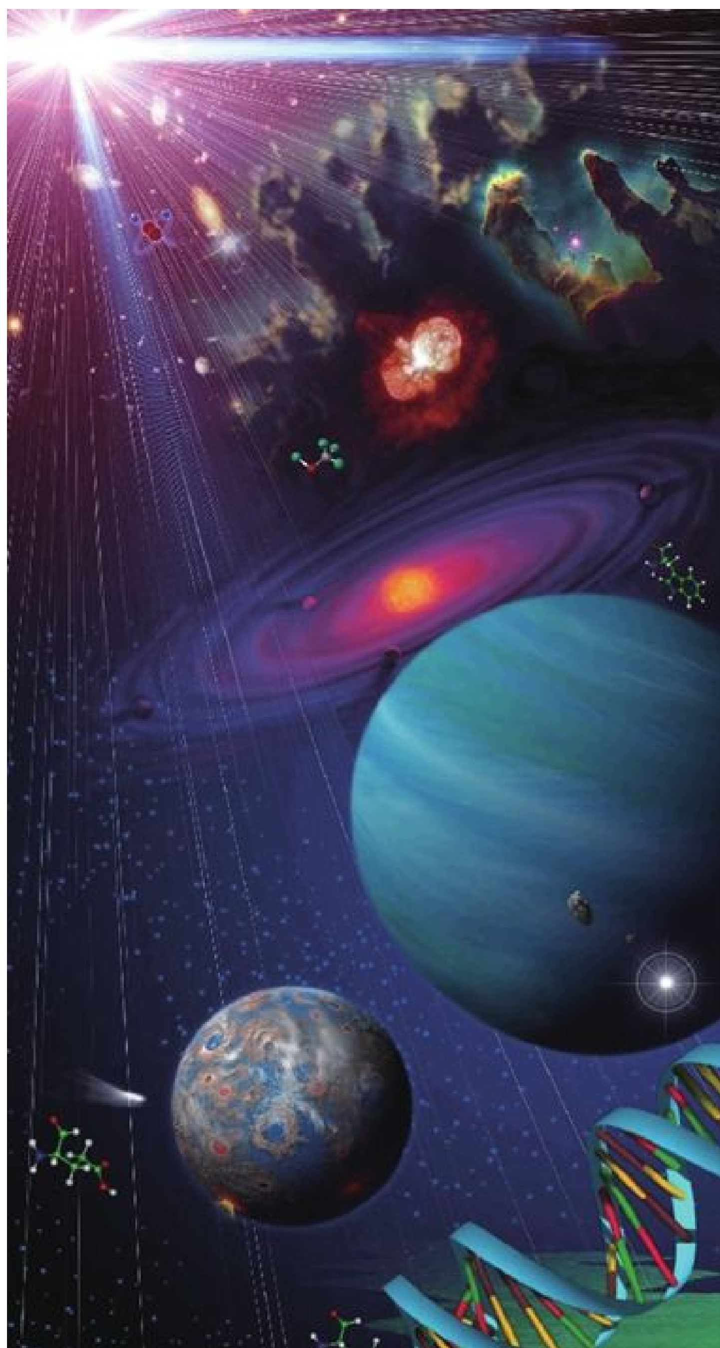


图10.8天体生物学是一门跨领域学科，它寻找太阳系内和太阳系

外适于生命居住的环境，对地球上生命的起源和早期演化进行实验室和田野研究，探讨生命适应地球和外太空环境的潜在能力。天体生物学的研究要综合运用物理学、化学、天文学、生物学、分子生物学、生态学、行星科学、地理学、地质学等多门学科，来研究其他天体上可能存在的不同于地球上的生物圈和生命存在的可能性。

那么我们这个宇宙的存在，还有我们人类自身的存在，真的只是出于一种巧合？或者竟然就是出自一位造物主的巧妙安排？天文学家们认为，如果那6个数字与现在观测到的不同，照样会形成一个与我们现在的宇宙不同的宇宙。不同的6个数，会形成无限多个不同的宇宙。但是其中的极大多数宇宙不是胎死腹中就是难以演化为成熟的宇宙。只有6个数字大小合适、组合正确的宇宙，才能正常演化到现在我们看见的这个样子，才会出现我们—观测这个宇宙的智慧生物。

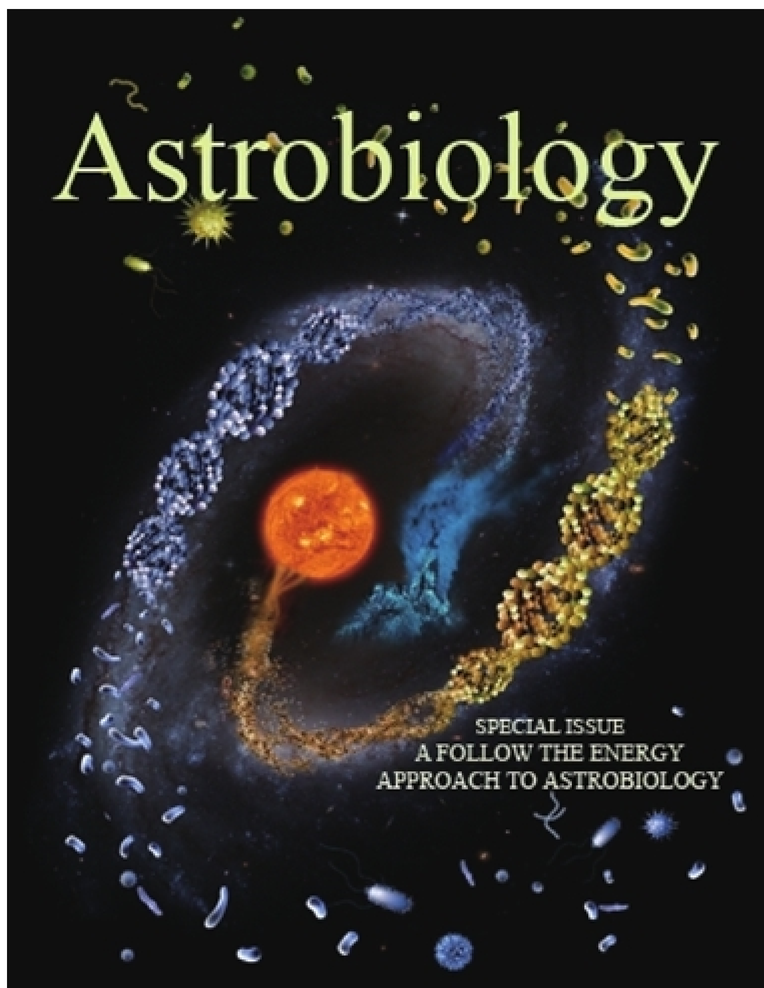


图10.9　美国NASA　埃姆斯研究中心的Tori　Hoehler主编的一期《天体生物学》。图片出处：CheryseTriano/ToriHoehler。

对人和宇宙的关系作如上描述的理论被冠以了一个名称，叫做人择原理（AnthropicPrinciple）。由于不同科学家对人择原理的理解和表述各有不同，大致形成了两种强弱不同的表述。弱人择原理认为，宇宙之所以是现在这个样子，是因为倘若它不是这样，就不会有谁来讨论这个问题了。强人择原理认为，在所有可能的宇宙中，我们观测到的宇宙是唯一一个能够演化出像我们这样的智慧生物的宇宙，这是由观测到的宇宙参数决定了的。

尽管人择原理是从最新的观测证据出发、建立在精致的理论模型之上的，但是自从它被提出之日起，就经受着各种各样的批评。有人

指出人择原理不能被科学地证实或证伪，尤其是“多重宇宙”的思想，那些退化了的、没有演化出智慧生物的宇宙，是我们这个宇宙中的智慧生物根本无法观测证实的。还有，人择原理也为“神创论”者提供了一个方便之门，尽管人择原理的提出者都是不同意“神创论”的，但似乎仍不妨碍“神创论”者们援引人择原理来“用科学的方法证明上帝的存在”。

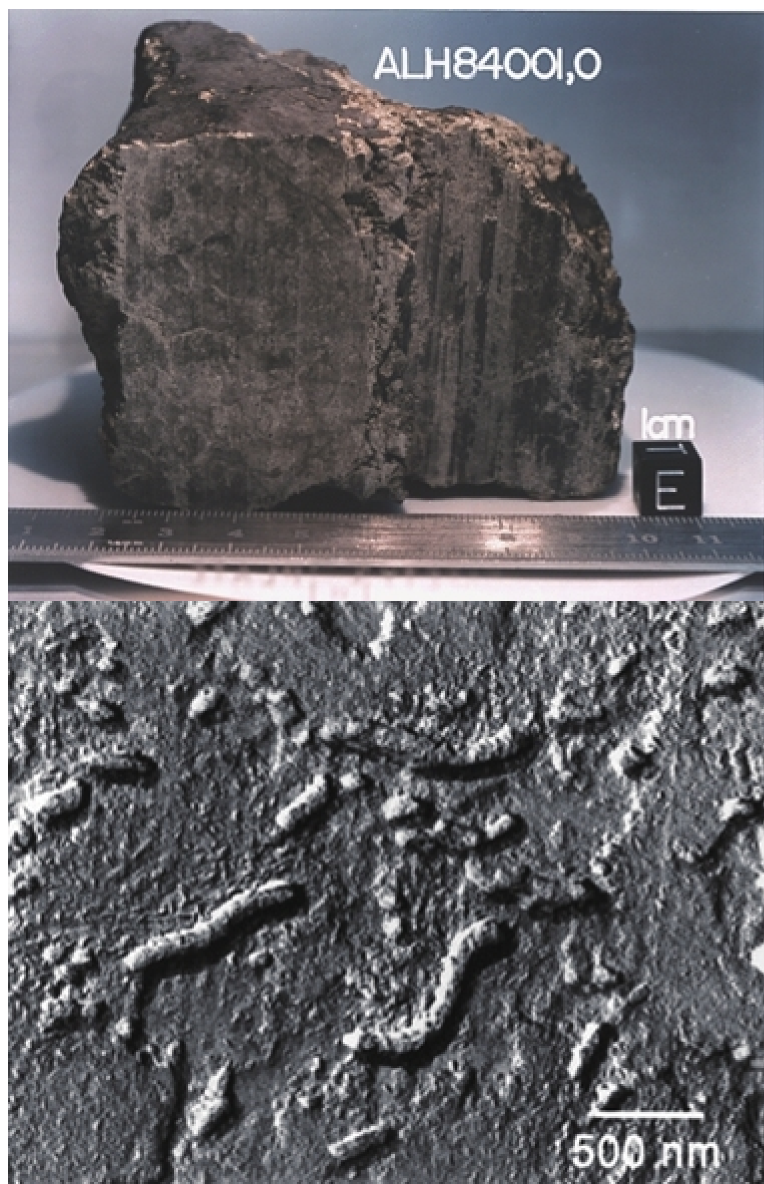


图10.10　来自火星的陨石（上）和电子显微镜下的疑似有机生物化石（下）。

对人择原理的争论似乎很容易滑向哲学和宗教，但对于宇宙中生命的起源、演化、分布等问题所进行的研究已经形成了一门具体的专门学问，那就是天体生物学。地球是迄今所知唯一适于生命居住的行星，但是天体生物学、实测天文学等领域内取得的进展，和在各种严酷环境中发现的大量极端微生物这一事实，预示着生命也许可以出现在宇宙中其他地外环境中。

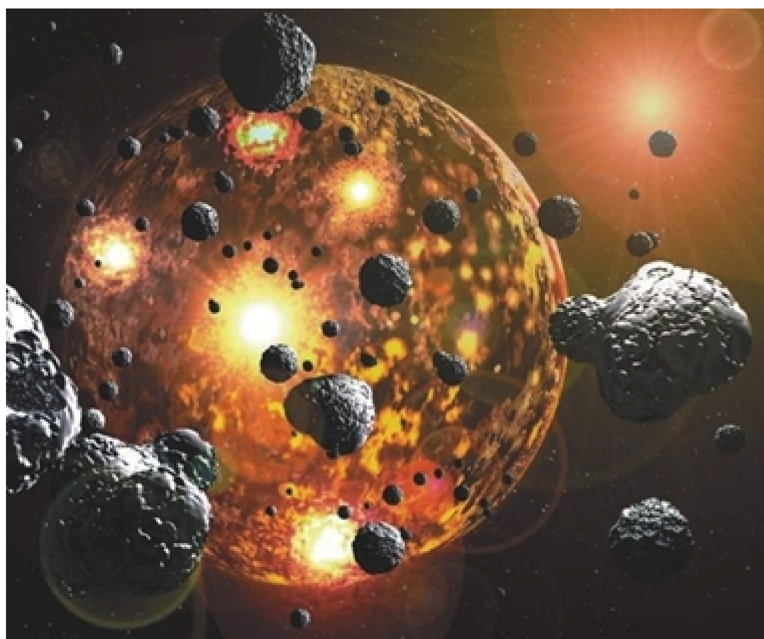


图10.11　地球早期遭受流星和彗星撞击的艺术想象图，作者：Julian Baum。



图10.12　一颗携带生命种子的彗星撞击地球的想象图，作者：Don Davis, NASA。

作为一门学科，天体生物学的历史并不长，但它在逐渐成为一门热门的学科，近年来各种新成果也层出不穷。譬如，在1996年8月6日美国航空航天局公布了一条爆炸性消息：通过对一块采集自南极的编号为ALH84001的火星陨石的研究，证明30多亿年前火星上曾经存在过一种原始形态的微生物。

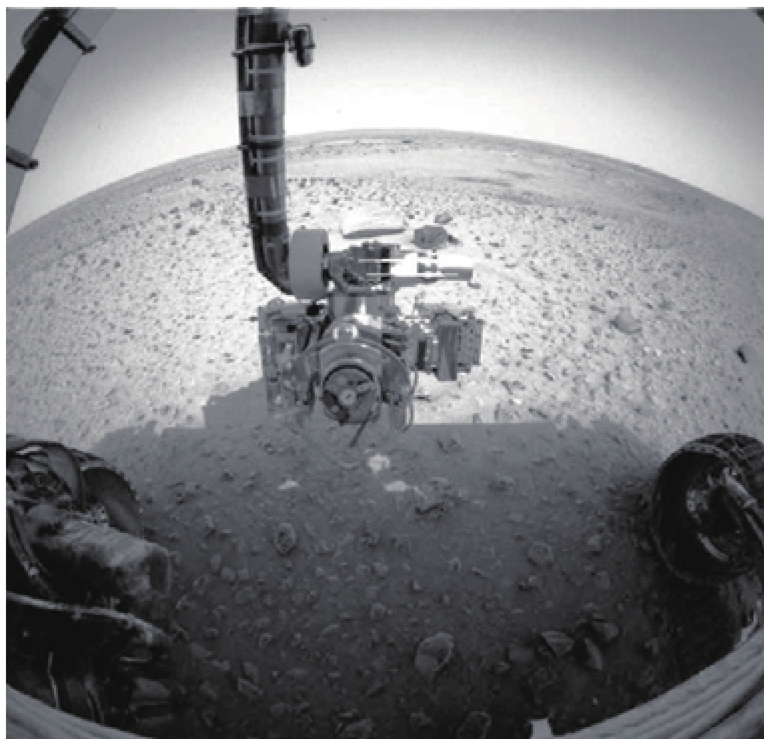


图10.13　勇气号的机械臂伸向一块岩石。

一块石头是怎么成为生命的证据的呢？火星和我们的地球一样，形成于46亿年前。有人推测大约在40亿年前，地球上就出现了地球生命的共同祖先。此后一直到10亿年前，地球看起来像一块不毛之地，海洋里没有海藻，陆地上没有树木，但那时的地球充满了生命—细菌和太古菌。在这些微生物的参与下，某些沉积岩会形成独特的“叠层”结构。科学家们相信，岩石中的“叠层”结构就是生命存在过的证据。但是地球的岩石圈经历了多次更替，保留在地球表面的35亿年以上的岩石非常稀罕。而有学者相信火星表面仍旧布满着35亿到40亿年前形成的岩石，火星太古生命的证据就在这些火星岩石中。

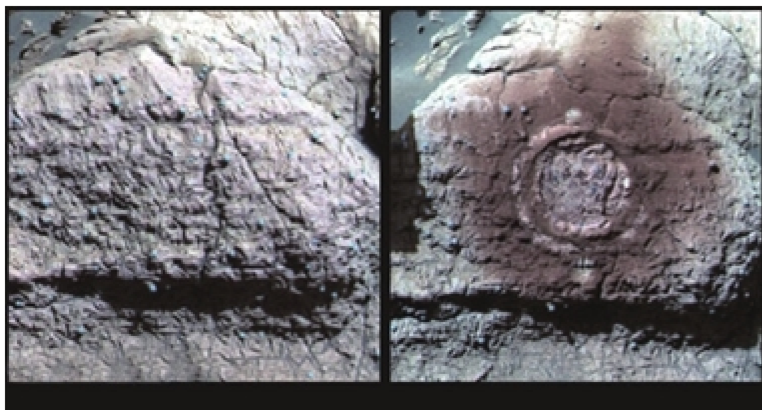


图10.14　机遇号给一块火星岩石打洞前后的照片。

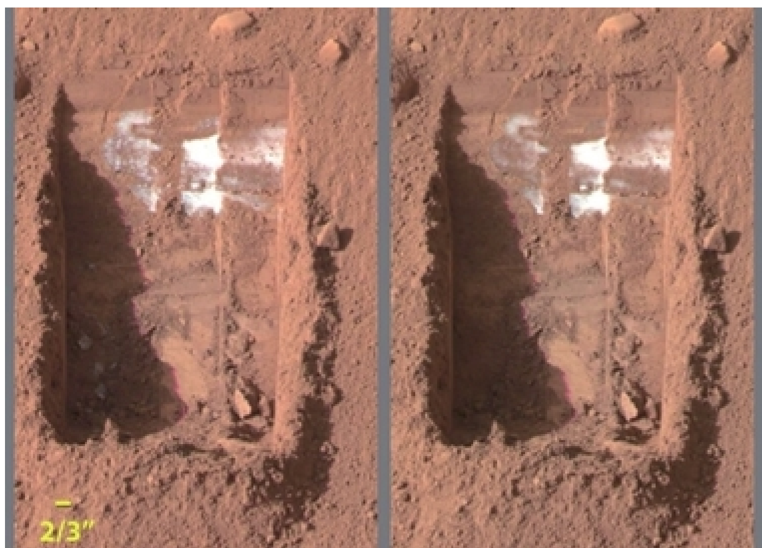


图10.152008年5月25日美国的凤凰号着陆器又成功降落到火星表面，检测到了火星浅层土壤中有固态水存在：比较2008年6月15日和18日凤凰号着陆器拍摄的两张照片，可见白色物质有升华的迹象，是固态水存在于火星浅层土壤中的证据。

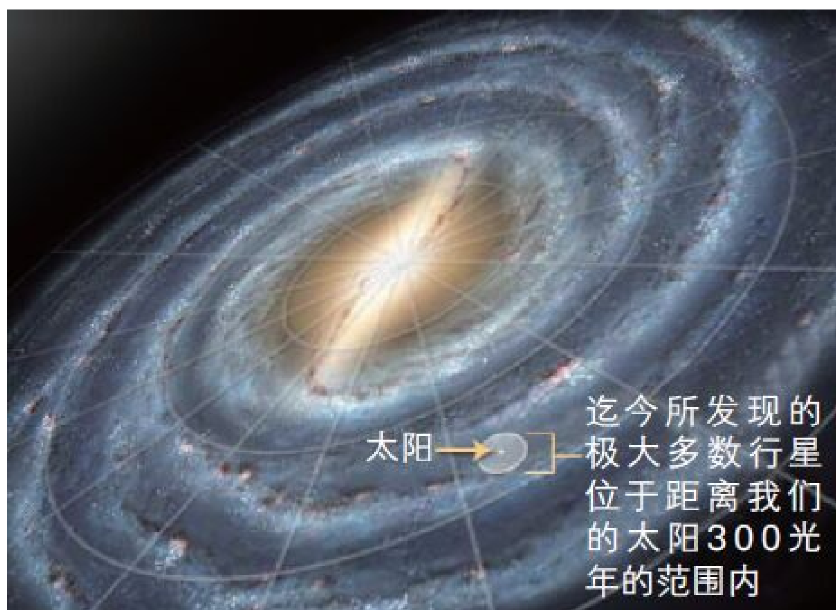


图10.16迄今为止，人类搜寻系外行星的范围只限于离开太阳300光年的范围，这么小的范围内就已经找到了这么多行星，预示着银河系内行星可能是普遍存在的。

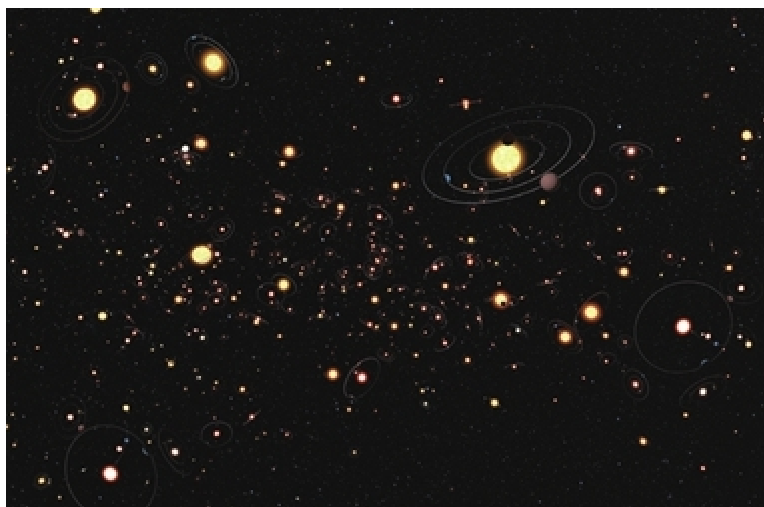


图10.17　《系外行星无处不在》，艺术想象图，作者：ESO/M. Kornmesser。

有一种生命起源理论认为，生命应该起源于行星形成的非常早的时期，那时火星也好，地球也好，还在遭受大大小小的陨星的频繁撞

击。作为生命基础的有机分子和一些冰、尘埃和石头混合在一起形成彗星在太空中穿梭着。彗星进入内太阳系不停地撞击早期被强烈的太阳风吹拂得只剩下重元素的类地行星，带来了水和有机分子，在行星上创造出适宜生命繁衍的环境。



图10.18 《彗星》，Joe Heller为《危险，恐龙》画的插图。



图10.19　彗星撞击地球的效果想象图。

2004年1月成功登陆火星表面的美国“勇气号”和“机遇号”探测器则是要从火星岩石中寻找生命能够存在的证据—水。它们的工作基于这样一个原理：一些特别种类的矿物的形成必定需要水的存在，如果能找到这样的矿物，就是找到了存在过水的证据。“勇气号”和“机遇号”在火星表面漫游，寻找合适的岩石在上面打洞，分析岩石的成分。根据传输回来的分析结果，NASA已经宣布：火星表面曾经存在过大量的水。



图10.20　一颗较大尺度小行星撞击地球的效果想象图。

当然从用光谱分析法找到的水存在过的证据到一个能与我们进行交流的“火星人”之间，还存在着巨大的差距。乘坐飞碟光临地球的外星来客看来暂时还只能存在于幻想中。美国人的SETI（搜寻地外智能生物）计划—默认了地外生命起码拥有了无线电通讯的能力—是一种充满幻想和浪漫的尝试，而从火星石头中去寻找地外生命的证据则是一种更为脚踏实地的努力。从生命的源头找起，就算只找到一些细菌，也是寻找地外生命零的突破，从而大大增加了宇宙中其他行星系中存在生命的可能性。截至2012年8月15日，天文学家们已经在623颗恒星旁边找到了777颗太阳系外行星，统计表明超过半数的类太阳恒星拥有至少一颗行星。也许我们人类在宇宙中真的不是孤独的。

恰当频率的小行星或彗星撞击，不仅使得生命在行星上得以起源，还是促使生命在行星上演化的动力。按照现在的一种理论，人类能够出现在地球上就是得益于一颗中等尺度的小行星对地球的撞击，那次撞击灭绝了恐龙，使得地球上的小型哺乳动物得到繁衍的机会。

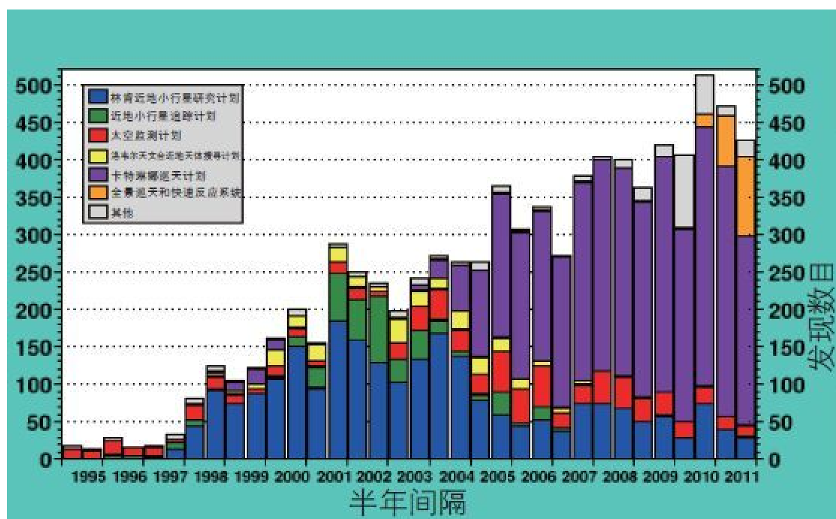


图10.21　历年来以多种方法追踪到的近地天体数量统计。

6500万年前的某一天，某只可能正在觅食的恐龙突然感觉到大地在颤抖，然后看见远处地平线上尘土喷涌而起，接着蓝天被烤得通红，炽热的岩浆雨夹带着被烤焦的同类的残骸从天空倾泻而下。这只恐龙来不及看到更多的惨景，自己也迅速被扑面而来的热脉冲烧烤成灰烬。曾经控制地球长达一亿多年的庞大物种在几个小时内就从地球上永远消失了。

以上是几位科学家关于恐龙末日全景图的最新构想。科学家推测恐龙灭绝是由于一颗直径在10公里左右的小行星撞击地球引起的。但之前一般认为撞击激起的灰尘遮蔽阳光可能达数千年之久，从而切断了食物链，处在食物链顶端的恐龙在饥饿和寒冷中慢慢灭绝。无论是几个小时的“突然灭绝”还是成千上万年的“缓慢灭绝”，在地质年代上都是短短的一瞬间。

跟恐龙的突然灭绝一样，恐龙在地球上的出现也是突如其来。23100万年前，也即恐龙出现之前，地球上四分之三的物种突然灭绝。研究人员一直在寻找这次物种大灭绝的原因，最近他们在那个年代的地层中找到的一种特殊分子—巴基球—中发现了来自地球之外的物质，从而推断是一颗直径为6到12公里的小行星或彗星的撞击导致了这次物种大灭绝。这次撞击为卑微的蜥蜴清除了竞争对手，让它们在几百万年里一跃而进化成为统治地球的庞大物种—恐龙。



图10.22　德雷克在格林班克天文台。



图10.23　卡尔·萨根（右坐者）和其他“行星社”创始人在一起（1980年）。

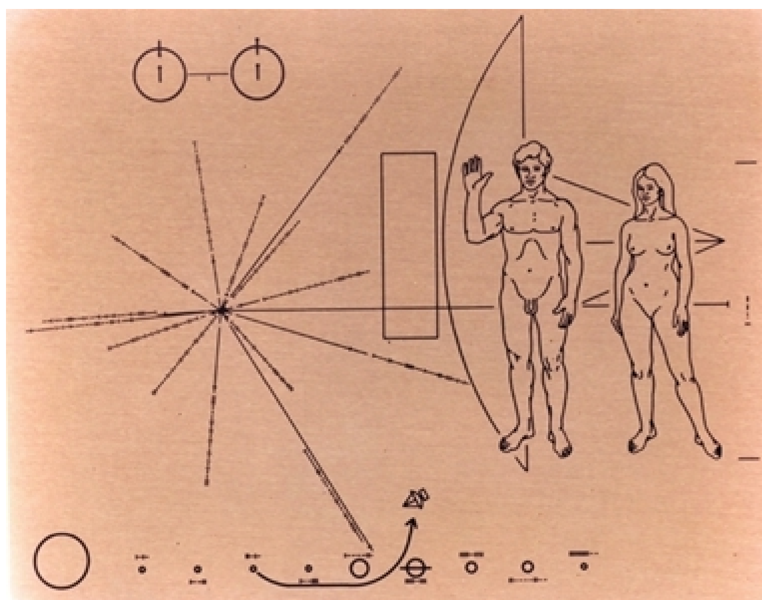


图10.241972年3月3日和1973年4月5日美国先后发射了先驱者10号和11号。先驱者10号和11号上携带的地球人名片：描绘了男人和女人的形象，利用与银河系内13颗脉冲星的相对位置标注了太阳的位置，并图示了地球在太阳系中的位置。

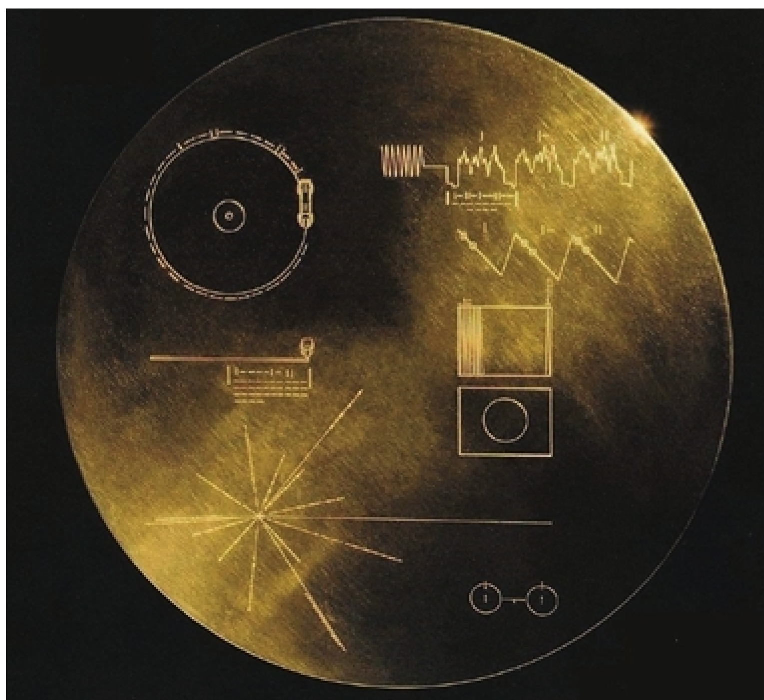


图10.25来自地球的问候：旅行者1号和2号上的唱盘。唱片的开始是用编码解释的116幅代表地球景色和事物的画面，包括地球在银河系中的位置，脱氧核糖核酸，染色体和人体，太阳，地球和大气成分，山河海洋，花草树木，动物植物，万里长城、泰姬陵、金门桥等。唱片中还有地球上的各种声音、古典音乐、美国总统和联合国秘书长的问候及60多种语言的问候词。人类的这种交流愿望是基于外星人是善良的这一假定的，对此当然也不是没有争议。有人担心，如果存在外星文明，它们的道德标准与我们的可能不一样，我们对于它们而言也许就是丰富的蛋白质资源。

有证据表明在过去5亿年里地球上有过5次物种的大灭绝，科学家们猜测它们很有可能与小行星的撞击有关。天文学家们对小行星撞击地球的概率进行了估算后得出，大约每隔一亿年就会有一颗直径在10公里左右的小行星撞击地球，这样的撞击足以引起地球上的大半物种灭绝。较小的但足以毁坏一座城市的撞击大约每1000年到10000年发生一次。即使是毁坏一座城市的小撞击也不是我们人类愿意看到的，所以美国NASA执行了一个NEAT（近地小行星追踪）计划，希望到2015年前把90%以上的对地球有潜在撞击危险的小行星都编好目录、进行监测，万一发现它们中的某一颗要撞击地球，就发射飞船去改变它的轨道。

显然，天文学的进步不只是让人类知道自己在宇宙中有多么渺小，也能让人类更好地适应这个宇宙—保护好地球这个家园，让人类这个物种避免恐龙的灭绝命运。

但是，有时灾难并不一定来自外太空。在有文字记载的几千年人类历史中，地震、海啸、洪水、干旱、天花、鼠疫、种族屠杀、宗教迫害、为争夺生存空间而进行的战争等等种种天灾人祸时刻威胁着人类的生存，只是它们还没有或尚不至于把人类作为一种物种从地球上消灭干净。

随着人类认知能力的进步，这份威胁人类生存的天灾人祸名单在过去的几十年里又增加了几样。譬如由于人类的过分活动导致全球变暖引起生态环境急剧变化从而威胁人类生存。生物技术的失控将会给人类带来灾难，人造的致命病毒在未来有毁灭人类的可能性。另一种可能的生态灾难会来自一种纳米级的人造生物复制机器，这种生物机器的使命就是汲取周围的有机物来复制自己，它们像花粉一样四处传播，最后将吞噬掉整个的地球生物圈。

1961年11月第一届SETI会议在美国西佛吉尼亚州的格林班克召开，与会者们商讨的议题是以何种方式搜寻外星无线电信号最为合理。SETI的成立基于这样的信念：（1）宇宙中生命是普遍的；（2）宇宙中在足够近距离内存在拥有了无线电通讯能力的智慧生物；（3）这些智慧生物跟我们人类一样乐于和渴望与外星生物沟通；（4）这些智慧生物是友善的，虽然人类中的大部分对虚构的外星生物却不友善。

在这次会议上，SETI组织最著名的发起人德雷克提出了一个估算银河系中能够并愿意进行星际通信的文明数目（N）的公式，后来被称作德雷克公式：$N = R^* \times fp \times ne \times fl \times fi \times fc \times L$。其中$R^*$是银河系中恒星的每年形成数量，fp是拥有行星的恒星比例，ne是一个平均行星系统中可居住行星的比例，fl是出现任何生命形式的可居住行星比例，fi是生命进化到智慧生物的可居住行星比例，fc是技术能力达到能够并愿意进行星际通信能力的外星社会比例，L是技术上先进的文明存在的平均期限。

SETI计划的早期参与者们给出了一个估计：N = 100万。进而算出先进文明之间的平均距离为几百光年。卡尔·萨根还计算出银河系中的每一颗恒星平均10万年就有外星文明来访一次。每一颗拥有智慧生命的恒星每1万年就会接待一次外星访客。

当然上述估算的不确定性也是显而易见的。一个典型技术文明的寿命到底是多少？技术文明毁灭的可能方式包括小行星、彗星撞击、全球性气候变化等天灾，和核战争、生化武器、失控的实验、资源过度开发等人祸。有识之士警告说，人类能活过本世纪的概率是0.5。

这也很可能是为什么我们看不到有外星人来访地球的原因，因为外星文明在拥有星际航行能力之前就把他们自己毁灭了。因此，变量L的意义不在于能否找到外星文明，而在于警示我们人类不要自我毁灭。

先驱者10号和11号上有我们地球人送给外星人的名片。或许，幸存的外星文明将教我们如何活过这个世纪。但在他们到访地球之前，人类先不能毁灭自己或被毁灭。

后记

2012年的夏天我没日没夜、挥汗如雨地敲着键盘、移动着鼠标，那个时候地球自转带来的昼夜变化暂时失去意义，那个时候我特别希望我们的太阳是一颗红矮星。《天文学的历史》这份书稿必须在8月份完成，这是我自己给自己定的最后期限。江苏人民出版社的汪意云编辑是我遇到过的最淡定的编辑，她过问书稿的进度是以回归年为周期的，当她第三次打电话来商量什么时候能交稿的时候，我知道不能有第四次了。

书稿迟迟未能完工，除了近两年确实琐事缠身之外，还有一个问题也让我比较纠结：那就是应该写一部什么样的天文学的历史？我在学校里教天文学史，学生既有本科生也有研究生，课的上法就不一样。对本科生主要以培养能力和兴趣为主，希望他们在掌握一些天文学史常识的同时能学会以一种多元、宽容的态度看待历史和身边的人和事。对研究生就会更多地纠缠历史细节，处理更多的原始文献，为他们将来步入学术生涯做好入门的训练。但这一本《天文学的历史》的读者主要将不是在校学生。

当然，以学校的围墙为界把人分成学校里的和学校外的两部分，这本身没有多少道理。一些从历史中获得的感悟适用于所有人。就拿天文学史来说，它所展示的天文与其他人文学科在历史上的密切关联和互动的图景，有助于人们获得一种人类知识的整体观念。现代科学的专业分类越来越多、越来越细，如果把整个人类知识体系比作一颗大树的话，普通的专业学习只是涉及了一根树枝甚至只是一片树叶，这种过分狭窄的专业视野无疑是有害的。

在当前的科学普及中，经常会面临的一个难题是：如何把高深晦涩的科学理论传授给公众。新闻媒体在传播重大科学进展时往往都忽略掉相关的理论背景，只突出强调孤立的科学事实和成果。这样一种支离破碎的普及模式，带给人们的只是一些无根的“知识碎片”，无法让人从整体上深入地把握科学知识。有时这种科学普及模式甚至走向反面，给科学知识蒙上一层神秘面纱。

事实上，如果把科学普及的目标设定为告诉受众这些科学知识是什么，那么就很难摆脱以上这种模式。毕竟在普及现代宇宙学知识时，要公众先掌握量子引力理论是不现实的。实际上，科学普及的真正目标应该是让公众去了解问题提出的背景，体会科学发现的过程，从中领会科学探索的方法，进而培养出一种独立的理性思索能力和不迷信、不盲从的科学精神。

为了达到这个目的，恰当的办法是告诉受众这些知识是怎么来的，即引入历史的视角。

在科学普及中引入历史视角，可为公众理解科学提供一个必要的知识背景，通过还原出科学史上一些关键问题的提出和解决的历史现场，使得科学知识成为“有根”的而不是“空降”的知识。

基于以上想法，我希望这一部天文学的历史能告诉读者人类是如何和自然打交道的，能告诉读者人类是如何认识到自身在宇宙中的位置以及这种认识是如何演进的，能告诉读者天文学与人类的社会、文化和思想领域之间是如何发生互动的。

观测手段的进步带来了现代天文学的突飞猛进，人类的探索不断向宇宙深处推进，有更多的人可能希望从源头上来根本性地认识天文学这一学科，从而了解现代天文学何以能达到现在这个水平。希望本书也能满足这一部分读者的求知欲望。

钮卫星

2012年8月17日

于上海闵行